

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
БАСЕЙН РЕКИ СЕВЕРНАЯ ДВИНА. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК И ВЛИЯНИЕ НА НЕГО КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ	7
1.1 Физико-географическая характеристика	7
1.2 Природные условия	8
1.2.1 Рельеф	8
1.2.2 Закономерности перемещения воздушных масс	9
1.2.3 Климатические условия в различные сезоны года	9
1.3 Водный и ледовый режимы рек. Опасные ледовые явления. Затопы	11
1.3.1 Речная сеть и водный режим рек	11
1.3.2 Ледовый режим рек	12
1.3.3 Опасные ледовые явления	14
1.3.4 Механизм образования затопов льда	14
1.3.5 Факторы образования затопов на реках бассейна Северной Двины	15
1.3.6 Затопоопасные участки рек бассейна Северной Двины	17
1.4 Климатические изменения в бассейне р. Северная Двина и их влияние на водный и ледовый режимы рек	18
1.4.1 Изменения климата в бассейне по данным различных исследований	18
1.4.2 Изменения водного режима рек	20
1.4.3 Изменения ледового режима рек	21
1.4.4 Влияние наблюдаемых изменений на образование затопов	23
КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В БАСЕЙНЕ РЕКИ МАЛАЯ СЕВЕРНАЯ ДВИНА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЗИМНИЙ И ВЕСЕННИЙ СТОК, А ТАКЖЕ ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ РЕК	25
2.1 Факторы формирования затопов в узле слияния рек Сухона и Юг.	25
2.2 Анализ климатических изменений в осенне-зимний период в бассейне р. Малая Северная Двина	30
2.2.1 Цели и задачи исследования	30
2.2.2 Исходные данные	30
2.2.3 Методика исследования	31
2.2.4 Результаты	32
2.2.5 Выводы	35
2.3 Влияние климатических изменений на зимний и весенний сток рек в бассейне р. Малая Северная Двина.	36
2.3.1 Цели и задачи исследования	36

2.3.2	Исходные данные	36
2.3.3	Методика исследования	37
2.3.4	Результаты	38
2.3.5	Выводы	41
2.4	Вероятное влияние наблюдаемых изменений на образование заторов у г. Великий Устюг	41
ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ О ЗАПАСЕ ВОДЫ В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ		
		43
3.1	Введение	43
3.2	Исходные данные	44
3.2.1	Глобальные базы данных о запасе воды в снежном покрове	44
3.2.2	Данные наземных наблюдений	48
3.3	Методика исследования	49
3.3.1	Первичная обработка информации	49
3.3.2	Методика оценки точности и взаимосравнения данных	49
3.4	Результаты	51
3.5	Выводы	58
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		59
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ		61

ВВЕДЕНИЕ

Северный край расположен на северо-западе Европейской территории России и включает в себя бассейны рек, впадающих в Баренцево и Белое моря (Онега, Северная Двина, Мезень, Печора и др). Это регион с богатой историей, сохранивший уникальные памятники русской культуры. Он покрыт густыми хвойными лесами и насчитывает тысячи больших, средних и малых рек, а также множество озер.

С начала заселения этой территории и до наших дней жизнь местного населения неразрывно связана с режимом водных объектов. Исторически расселение людей в регионе происходило по берегам многочисленных рек и озер [4]. Реки – это как источник чистой воды, так и естественная «дорожная сеть». Летом по ним осуществляется судоходство и лесосплав, а зимой они становятся полноценными ледовыми дорогами. Размещение населенных пунктов вблизи рек, зачастую на поймах, обуславливает повышенный риск их затопления при наводнениях. Последние характерны в период половодья, и часто бывают вызваны заторами льда при весеннем ледоходе [30]. Так, в рассматриваемом регионе от состояния водных объектов зависят безопасность жизнедеятельности населения, транспортная доступность населенных пунктов, бесперебойность работы водозаборов и др. Продолжительные, суровые зимы определяют большую роль ледового режима рек в функционировании промышленных и хозяйственных объектов [2, 4].

Важной чертой ледового режима рек севера Европейской территории России (далее – ЕТР) является образование заторов льда при вскрытии рек. Затор – это многослойное скопление льдин в русле реки, образовавшееся во время подвижки или ледохода, вызывающее стеснение водного потока и связанный с этим подъем уровня воды [8]. Заторы различной мощности случаются на крупных реках бассейна Северной Двины ежегодно – для них это естественный этап процесса вскрытия. Однако существуют такие участки, на которых возможно образование очень крупных и весьма устойчивых заторов, которое сопровождается подъемом уровня выше по течению вплоть до катастрофических отметок. Населенные пункты, расположенные близ таких участков (например, г. Великий Устюг, г. Котлас, г. Архангельск), периодически страдают от наводнений заторного характера. Такие наводнения могут принести очень значительный материальный ущерб, поскольку пойма затапливается водой с большим количеством плывущего льда, на берегах наблюдаются навалы огромных ледяных глыб. Это приводит к разрушению береговых построек, пристаней, причалов и пришвартованных судов.

Формирование заторов обуславливается совокупностью морфометрических, климатических и гидрологических факторов. Последние, как правило, играют важную роль [8]. При этом водный режим реки, в свою очередь, определяется климатическими условиями.

Большое количество влияющих факторов, в различной степени взаимозависимых, обуславливает сложность изучения заторных явлений.

Наблюдающееся во всем мире потепление климата, которое затронуло и рассматриваемый регион, уже сказывается на водном режиме рек [15]. В целях обеспечения безопасности населения, а также поддержания эффективности хозяйственной деятельности в новых климатических условиях необходим мониторинг климатических и гидрологических изменений, их комплексная оценка и изучение реакции на них ледового режима рек (включая заторные явления). Характер влияния наблюдаемых изменений на повторяемость крупных заторов льда еще не получил однозначной оценки.

Чтобы глубже понять влияние потепления климата на процессы заторообразования, прежде всего, необходимо изучить, как оно сказывается на водном режиме рек. Поэтому цель настоящей работы заключается в том, чтобы оценить климатические изменения, происходящие в бассейне Северной Двины в холодный период года, и выявить влияние этих изменений на водный режим рек в зимние и весенние месяцы. Изучение факторов затороформирования в их взаимозависимости даст основание делать выводы о том, как наблюдающиеся климатические тенденции влияют на механизм образования заторов и чего можно ожидать при их сохранении в ближайшем будущем.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть и обобщить имеющиеся на сегодняшний день сведения о климатических изменениях и влиянии их на водный и ледовый режимы рек в бассейне р. Северная Двина;
- оценить величину и интенсивность климатических изменений в осенне-зимний период на примере одного из подбассейнов р. Северная Двина;
- выявить и количественно охарактеризовать влияние этих изменений на водный и ледовый режимы рек выбранного подбассейна;
- обосновать предположения о вероятном влиянии этих изменений на формирование заторов.

Стоит отметить, что процесс образования заторов в нашей стране достаточно хорошо изучен. Это неудивительно, поскольку, как говорилось выше, наводнения заторного характера периодически наносят большой ущерб населенным пунктам на севере ЕТР и в других регионах страны. В настоящее время существует большое количество методик прогнозирования максимальных заторных уровней воды. На особо затороопасных участках рек проводятся различные предупредительные меры, направленные на снижение максимальных заторных уровней [33]. Однако, несмотря на большое количество ресурсов, вкладываемых в эти мероприятия, их эффективность вызывает большие сомнения [3]. В качестве примера можно

привести последнее крупное наводнение в г. Великий Устюг в 2016 году, когда прогноз образования крупного затора был дан заблаговременно и с большой точностью, однако оказанные меры никак не способствовали его предотвращению [14].

Для рационального планирования эффективных противозаторных мероприятий необходимо изучение механизма образования заторов в изменившихся (и продолжающих меняться) климатических условиях. Превентивные меры должны быть направлены, в первую очередь, на минимизацию действия тех факторов, которые оказывают наибольшее влияние на этот процесс [23]. Уже сейчас в результате климатических изменений значительно изменились вклады факторов, определяющих образование заторов [7]. Это говорит о том, что меняется сам механизм, или, точнее, преобладающий сценарий их образования. Поэтому изучение этих факторов с точки зрения изменения их значений по сравнению с предшествующим потеплению периодом является весьма актуальной задачей.

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской темы Росгидромета «Разработка геоинформационной системы мониторинга гидрологического режима р. Северная Двина в зимне-весенний период для оценки вероятности возникновения опасных заторных наводнений». Специализированная информационная база многолетних гидрометеорологических данных, созданная в ФГБУ «Государственный гидрологический институт», стала основным источником исходной информации [27].

БАССЕЙН Р. СЕВЕРНАЯ ДВИНА. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК И ВЛИЯНИЕ НА НЕГО КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

1.1 Физико-географическая характеристика

Бассейн реки Северная Двина находится в северной части Европейской территории России. Река впадает в Двинской залив Белого моря. Преимущественное направление течения – с юга на север. Площадь бассейна составляет 357 тыс. км² [22]. С запада на восток территория простирается более, чем на 1000 км¹. Так, бассейн значительно вытянут в широтном направлении в промежутке от 60° до 63° с.ш. Лишь около 10 % территории в северной части бассейна приходится на приморскую низменность. Устье реки находится на широте 64°33' с.ш. Бассейн достаточно хорошо изучен и покрыт сетью стационарных наблюдений. На настоящий момент на его территории действует около 100 гидрометрических постов и около 50 метеостанций.

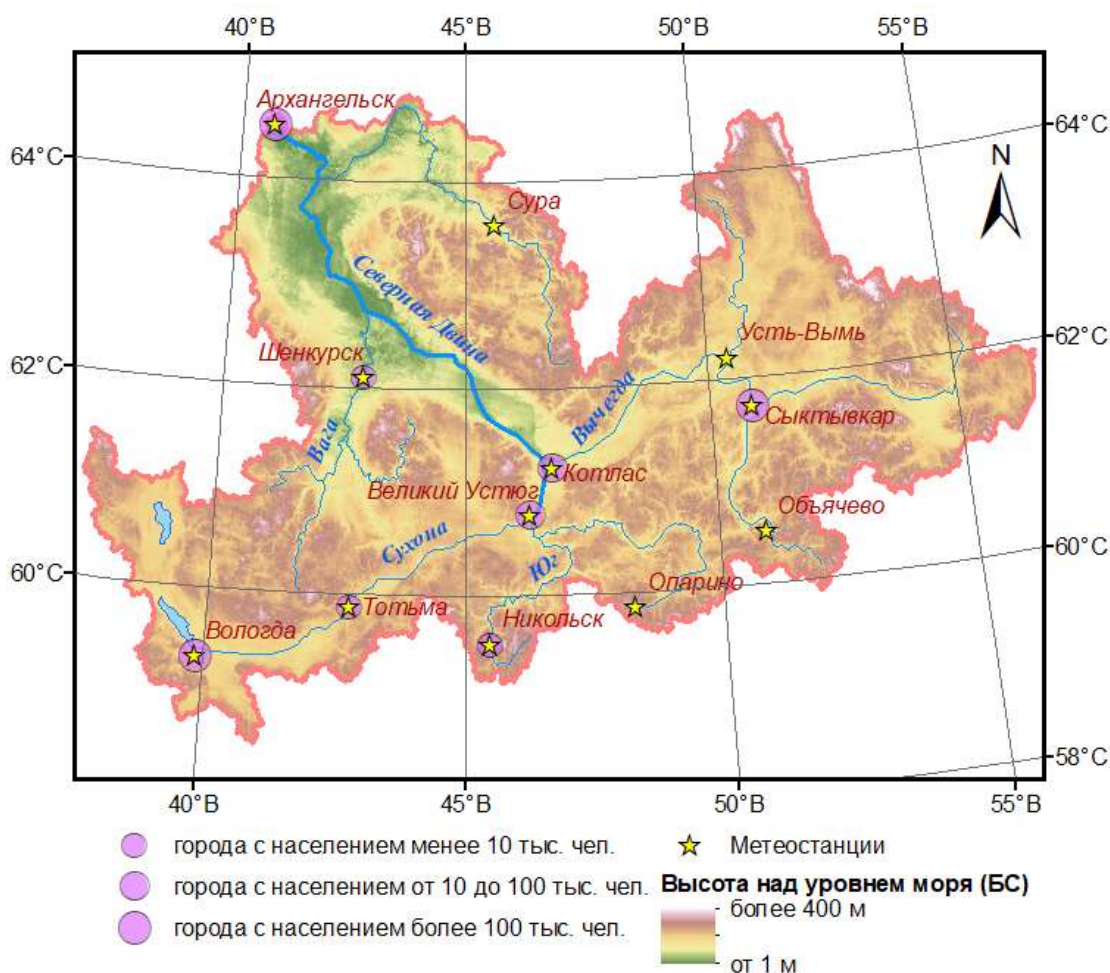


Рисунок 1.1 Бассейн реки Северная Двина

¹ Здесь и далее характеристики географического положения получены в программном обеспечении ArcMap 10.4.1 с использованием цифровой модели рельефа GTOPO.

Территория, на которой расположен бассейн, представляет собой холмистую равнину. Климат – преимущественно умеренный, вблизи морского побережья – субарктический, с избыточным увлажнением. Средняя годовая температура за многолетний период составляет 1.5 °С². Климат достаточно мягкий. Его континентальность увеличивается к востоку, тогда как на западе велико влияние Атлантики. Средняя годовая сумма осадков составляет 550-600 мм, причем осадки достаточно равномерно распределены внутри года с максимумом в летне-осенний период и минимумом весной.

Бассейн практически полностью покрыт лесом, преимущественно хвойным (еловая и сосновая тайга). Заболоченность территории не превышает 5 – 8 %, но на территории приморской низменности может достигать 15 – 20 %. Густота речной сети составляет около 0.5 км/км² [28].

Р. Северная Двина судоходна на всем протяжении и является важной транспортной магистралью, так же, как и ее крупные притоки: Сухона, Юг, Вага, Вычегда, Пинега.

Основная часть бассейна расположена на территории Архангельской и Вологодской областей, а также республики Коми. Основным направлением хозяйственной деятельности населения является лесозаготовка и целлюлозно-бумажная промышленность [30]. К числу крупных населенных пунктов относятся города Вологда, Сыктывкар, Архангельск с численностью населения более 100 тыс. чел. (см. рис. 1.1). В последние десятилетия наблюдается отток населения из рассматриваемого региона и высокий уровень урбанизации, что связано, в числе прочего, с природными условиями и недостаточной развитостью инфраструктуры [12].

1.2 Природные условия

1.2.1 Рельеф

Территория бассейна представляет собой равнину, полого опускающуюся к северу. Характерно чередование низменностей (10 -70 м) с относительно возвышенными равнинами и невысокими плато (100 – 250 м) [28]. Причем основная доля низменностей, как правило, приурочена к северной части бассейна и к долинам крупных рек в нижнем течении. Границы между низменностями и плато хорошо выражены уступами с высотой 50 – 100 м [28].

Средняя высота бассейна реки Северная Двина составляет около 140 м над уровнем моря³. Наибольшие высотные отметки приурочены к верховьям реки Вычегда (см. рис. 1.1). Эта река берет свое начало на возвышенных склонах Тиманского кряжа. Максимальные

² Здесь и далее – данные по метеостанциям, изображенным на рисунке 1.1, осредненные по площади бассейна за период 1958-2017 гг. (источник – официальный сайт ВНИИГМИ-МЦД [9, 10]).

³ Здесь и далее высоты определены по цифровой модели рельефа GTOPO.

высоты в бассейне Вычегды достигают 400 м, однако средняя высота все же не превышает 200-250 м.

Влияние Тиманского кряжа как орографического препятствия слабо сказывается на распределении осадков в бассейне, поскольку основная его часть расположена восточнее бассейна р. Мезень.

1.2.2 Закономерности перемещения воздушных масс

Расположение в высоких широтах, западный перенос воздушных масс и влияние северных морей определяют основные особенности климата рассматриваемой территории.

Характерна частая смена воздушных масс, определяющая непостоянство погодных условий. Осенью и зимой наблюдается высокая циклоническая активность, которая несколько ослабевает в летний период. Циклоны приходят с Атлантики и приносят пасмурную погоду и смягчение температуры (потепление зимой и похолодание летом) [28].

Несмотря на то, что Уральские горы являются значительным орографическим препятствием со стороны Сибири, континентальные воздушные массы периодически проникают на рассматриваемую территорию с юго-востока, принося сухую и ясную погоду. Это более характерно для зимнего периода и часто обуславливает суровые морозы [28].

Возможно также вторжение воздушных масс арктического происхождения, которые приносят сухую и холодную погоду в любое время года и сопровождаются сильными северо-восточными ветрами. В летний период такие вторжения наблюдаются чаще, чем в зимний [28].

Значительная циклоническая активность в сочетании с пологим рельефом обуславливает частые и сильные ветры. Зимой средняя скорость ветра составляет 3 - 7 м/с. Характерны метели [28].

Континентальность климата возрастает при движении от морского побережья на юго-восток. В западной и северной частях территории сказывается влияние морей и океанов, уменьшающее годовые амплитуды температур.

Подводя итог, хочется подчеркнуть, что важной чертой климата рассматриваемой территории является неустойчивость погодных условий, связанная с частой сменой воздушных масс.

1.2.3 Климатические условия в различные сезоны года

Поскольку бассейн Северной Двины расположен преимущественно в высоких широтах, для него характерна продолжительная зима и относительно короткое лето. Переходные сезоны, как правило, затяжные.

Устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через 0 °С происходит во второй декаде апреля – первой декаде мая. В апреле характерны флуктуации температуры воздуха с частой сменой периодов потепления и похолодания. Средняя многолетняя температура воздуха в мае составляет 8-9 °С. Возможны как потепления до 20 °С и выше, так и кратковременное возвращение морозов.

Устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через 10 °С происходит в конце мая – начале июня. Самый теплый летний месяц – июль со средней температурой 17 °С. Погода летом неустойчива. Возможны как жаркие дни, так и резкое похолодание (при вторжении арктических воздушных масс) вплоть до кратковременных ночных заморозков [28]. Циклоны с Атлантики приносят прохладную и влажную погоду. В летние месяцы выпадает наибольшее за год количество осадков (в среднем 60-70 мм/мес).

Осень в регионе характеризуется пасмурной погодой с осадками и сильным ветром [28]. Причем количество осадков сильно отличается от года к году: в отдельные годы месячные суммы осадков могут превышать 100 мм или наоборот не достигать и 40 мм. Среднее количество осадков в осенние месяцы составляет 50-60 мм/мес. Первые морозы начинаются в октябре (в редких случаях – в конце сентября), однако, как правило, часты потепления. Флуктуации температуры, как и весной, значительны.

Затяжной зимний период начинается во второй-третьей декаде октября и продолжается до начала-середины апреля. Поскольку зимой в регионе особенно сильно развита циклоническая активность, температура воздуха, как и в другие месяцы, часто меняется. Минимальные значения зимней температуры достигают -40 °С, однако каждую зиму наблюдаются оттепели с температурой воздуха до +3 - +5 °С и жидкими осадками [28]. Особенно часты оттепели в ноябре и декабре, что иногда задерживает формирование устойчивого снежного и ледяного покрова. В январе-феврале количество оттепелей значительно меньше, а в марте снова увеличивается. Общее количество дней с оттепелью с ноября по март составляет около 30 дней [28]. Среднее количество осадков в зимние месяцы невелико – 30-40 мм/мес.

Наиболее холодные месяцы в регионе – январь и февраль со средней температурой -14 °С и -12 °С соответственно. В марте наблюдается потепление, однако температура воздуха большую часть месяца все же остается ниже 0 °С. Март и апрель – самые сухие месяцы со средней суммой осадков около 30 мм/мес.

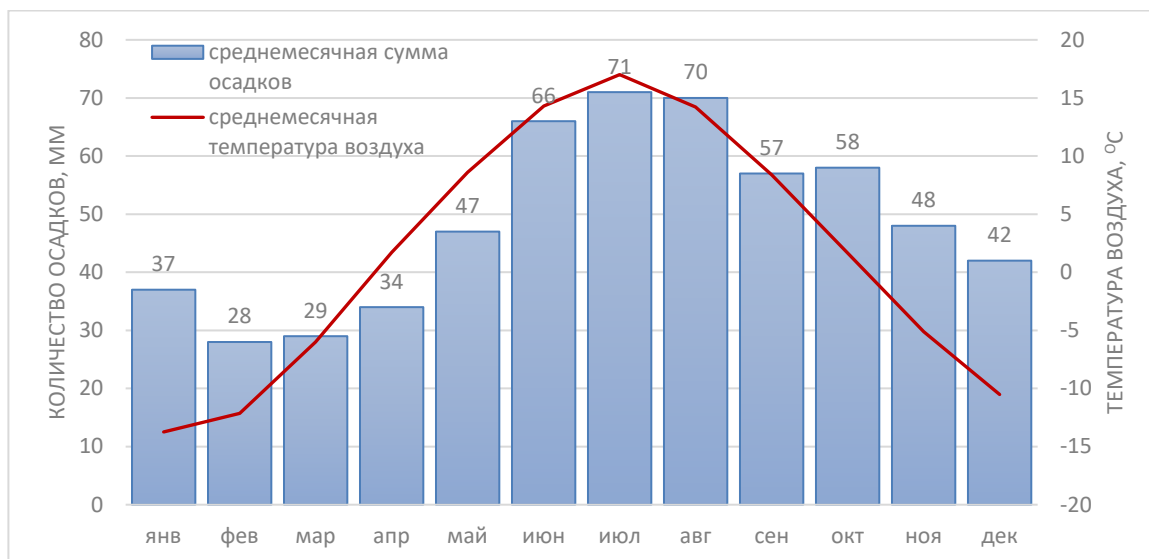


Рисунок 1.2 Климатограмма бассейна р. Северная Двина

1.3 Водный и ледовый режим рек. Опасные ледовые явления. Заторы.

1.3.1 Речная сеть и водный режим рек

Территория рассматриваемого бассейна в целом хорошо дренирована (за исключением приморской низменности). Густота речной сети близка к 0.5 км/км^2 [28]. Русла рек на низменных плато, возвышенных равнинах и на скатах с них имеют глубокий врез и немеандрирующее русло. Характерно переформирование дна русла в результате постепенного сползания гряд и побочней [28]. Крупные равнинные реки (Северная Двина, Сухона, Юг, Вага, Пинега) не меандрируют до выхода на низменные равнины. Для их русел характерна многоукавность и наличие крупных островов [28].

Питание рек – смешанное с преимуществом снегового. Характерно высокое половодье, на которое приходится 50-70 % годового объема стока [28]. Половодье начинается во второй-третьей декаде апреля в южной и центральной частях бассейна и в конце апреля – начале мая в северной и восточной [5].

Ход уровней на крупных реках бассейна и на самой Северной Двине в весенний период весьма сложный. Это обусловлено большим количеством притоков и ежегодным образованием заторов льда. На Северной Двине, как правило, наблюдается две волны половодья. Первая волна формируется на реках Сухона, Юг и Вага. Вторая волна приходит с р. Вычегда позже на 1-3 недели в зависимости от дружности снеготаяния [28].

Летне-осенняя межень прерывается паводками дождевого происхождения. Иногда они проходят сериями, обуславливая повышенный сток в течение нескольких недель. Зимняя межень ниже летней. В случае многоводной затяжной осени в начале зимнего периода могут наблюдаться относительно большие расходы воды, но концу зимы они, как правило, достигают минимальных за год значений.

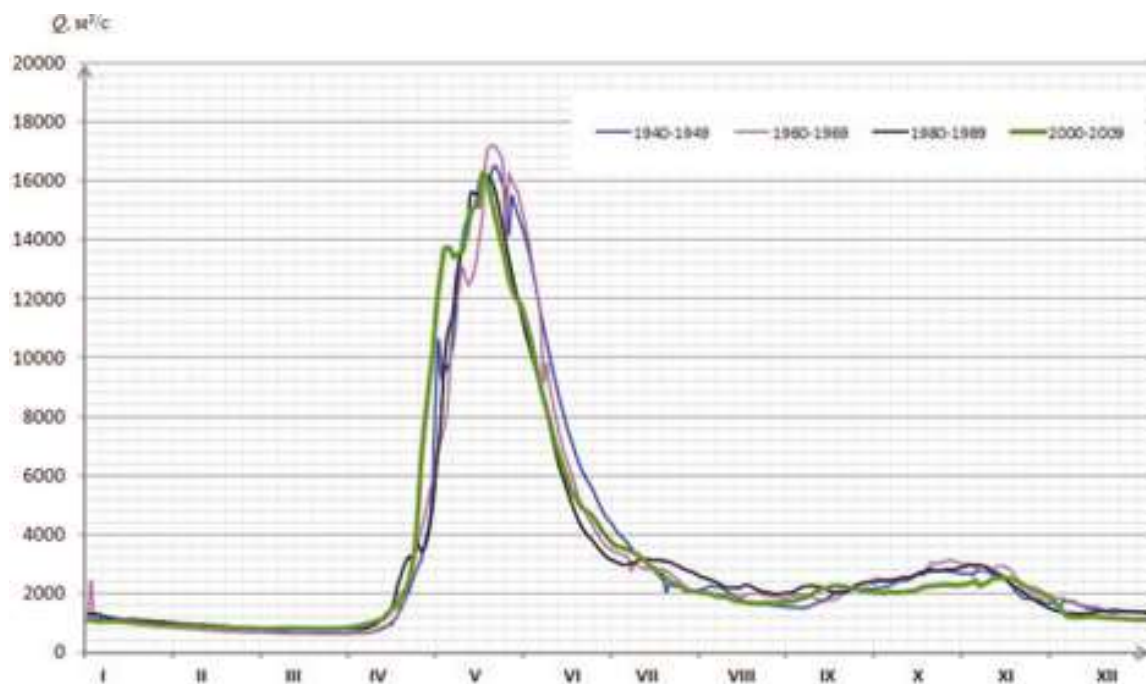


Рисунок 1.3 Гидрографы р. Северная Двина – с. Усть-Пинега, осредненные за различные десятилетия [32]

1.3.2 Ледовый режим

Сроки и продолжительность ледостава закономерно изменяются с юга на север и с востока на запад. В верхней части бассейна, на р. Сухона и р. Юг, ледостав, как правило, начинается в третьей декаде ноября, в центральной части бассейна – во второй, на севере и на востоке – в первой. В отдельные годы установление льда может сильно задерживаться из-за оттепелей и паводков.

Перед установлением ледового покрова на большинстве крупных рек наблюдается шугоход, иногда осенний ледоход [1, 8]. Продолжительность периода замерзания сильно варьирует от года к году в зависимости от погодных условий. Забегая вперед, стоит отметить, что большое количество шуги в русле, образование зажоров, замерзание рек при высоких уровнях – все это относится к неблагоприятным гидрологическим явлениям [2], а также является одним из факторов, обуславливающих формирование заторов в период вскрытия [7, 8].

Средняя продолжительность ледостава изменяется от 140 дней на юге до 185 дней в восточной части бассейна [28]. Максимальная за зиму толщина льда наблюдается в марте или в начале апреля и составляет 50-70 см [21].

Вскрытие происходит на большей части бассейна во второй половине апреля, в северных и восточных частях – в последние дни апреля или в начале мая. Важно, что вскрытие крупных

притоков Северной Двины происходит одновременно [28]. Это осложняет ледовую обстановку в период вскрытия.

Для описания изменчивости ледового режима по площади бассейна удобно прибегнуть к «районированию», предложенному в работе [1]. Авторы выделяют в бассейне три района по характеру ледового режима: южный, восточный и центральный.

К южному району относится бассейн р. Малая Северная Двина – до впадения р. Вычегда, включающий бассейны рек Сухона и Юг. Характерной особенностью р. Сухона является продолжительный период с ледовыми явлениями до установления ледостава (до 50-60 дней [1]). Процесс замерзания здесь, как правило, сопровождается густым шугоходом и ледоходом, нередко – с образованием зажоров. Ледостав продолжается 140-150 дней. Вскрытие р. Сухона происходит практически одновременно на всем ее протяжении, что объясняется субширотным направлением течения [1]. В среднем и нижнем течении р. Сухона заторы льда во время вскрытия случаются почти ежегодно [16], причем наиболее мощные из них приурочены к месту ее слияния с р. Юг.

К восточному району относится весь бассейн р. Вычегда. В этой части рассматриваемой территории климат наиболее континентальный, поэтому продолжительность ледостава здесь наибольшая. Замерзание сопровождается густым ледоходом с зажорами. Вскрытие происходит почти одновременно по всей длине р. Вычегда (что, как и на Сухоне, связано с преимущественно широтным направлением течения) и редко сопровождается заторами [1]. Вычегда, как правило, вскрывается на 1-3 недели позже, чем Северная Двина [28].

Центральный район представляет часть бассейна р. Северная Двина ниже впадения р. Вычегда. Поскольку направление течения Северной Двины здесь субмеридианальное, сроки замерзания и вскрытия изменяются по мере продвижения с юга на север. Вскрытие реки происходит от верховьев вниз и, как правило, сопровождается серией подвижек и образованием мощных заторов льда [1, 8].

Стоит упомянуть, что среди описанных закономерностей есть исключения. К ним относятся перекатные и порожистые участки рек, которые замерзают позже и вскрываются раньше. Также своеобразным ледовым режимом отличаются реки в карстовых районах (Емца, Шелекса и др.), и реки с озерным регулированием [1]. Влияние также оказывают многочисленные мероприятия, осуществляемые в бассейне для регулирования ледовой обстановки.

1.3.3 Опасные ледовые явления

Согласно [2], к опасным (т.е. с некоторой степенью вероятности приносящим социальный или экономический ущерб) ледовым явлениям относятся: образование внутриводного льда, зажоры, раннее появление льда, наледи, промерзание, низкая прочность льда в период ледостава, густой ледоход при высоком уровне воды, заторы, навалы льда, позднее вскрытие а также замерзание и очищение ото льда при низком уровне воды. Все это с разной степенью повторяемости случаются на реках рассматриваемого региона.

Перечисленные ледовые явления можно разделить на несколько групп в зависимости от того, какой сфере человеческой деятельности они наносят наибольший ущерб:

1. *Судоходство* (продолжительность периода с ледовыми явлениями и периода ледостава, низкие уровни воды при замерзании и вскрытии);
2. *Водоснабжение* (образование внутриводного льда, промерзание, низкие уровни воды);
3. *Инфраструктура* (толщина и прочность льда в период ледостава, продолжительность периода ледостава и периода с ледовыми явлениями);
4. *Населенные пункты* (зажоры, заторы, навалы льда, ледоход при высоких уровнях воды).

Крупные заторы льда – одни из наиболее опасных явлений. Они могут стать причиной подъема уровня до катастрофических отметок. Согласно оценке [42], 25-40 % общего ущерба от наводнений приходится на наводнения, обусловленные заторами льда. В рассматриваемом бассейне заторы льда случаются ежегодно, и в отдельные годы становятся причиной затопления населенных пунктов. Дополнительную опасность создают навалы льда при выходе воды на пойму на участке выше затора, что часто становится причиной значительных разрушений [16].

1.3.4 Механизм образования заторов льда

Затор – многослойное скопление льдин в русле реки, образовавшееся во время подвижки или ледохода, вызывающее стеснение водного потока и связанный с этим подъем уровня воды [8]. Заторы образуются, когда энергии потока недостаточно, чтобы взломать ледовый покров ниже по течению.

На крупных реках, текущих с юга на север, волна половодья, как правило, продвигается вниз по течению быстрее фронта потепления [8]. Поэтому часто в среднем и нижнем течении рек к моменту прохождения половодья лед все еще обладает значительной прочностью. Его кромка становится препятствием для льда, поступающего с вышележащего участка (или из крупного притока, вскрывающегося раньше главной реки). Так, заторы – естественное явление, ежегодно сопровождающее вскрытие крупных рек с преимущественно северным направлением течения.

Период существования затора может длиться от нескольких часов до нескольких дней [3]. Прорыв затора происходит, когда соотношение сил изменяется в пользу динамической силы потока в результате дальнейшего увеличения расхода и/или уменьшения прочности ледяного скопления под действием тепловых факторов. За время существования затора ледовый покров на нижележащем участке успевает потерять запас прочности, что обеспечивает свободное прохождение прорывной волны на некоторое расстояние [3, 8]. Когда, при движении вниз по течению половодная волна вновь встречает лед достаточной прочности, формируется еще один затор.



Рисунок 1.4 Концептуальный график соотношения основных сил, действующих на ледовый покров [42]

Большая повторяемость образования заторов наблюдается на участках, где уменьшается льдопропускная способность русла. Причины ее уменьшения можно разделить на следующие группы [8]:

- 1) *Гидравлические* – снижение скорости течения при уменьшении продольного уклона, в результате подпора в устьевой области или при впадении крупного притока;
- 2) *Аэрогидродинамические* – центробежные силы на поворотах реки, воздействие ветра;
- 3) *Морфометрические* – сужения, разветвления русла, перекаты и др.

Образование заторов льда на конкретном участке зависит от сочетания размеров и прочности льдин и гидродинамических условий потока [8]. Это сочетание определяется погодными условиями периода замерзания, периода ледостава и, в особенности, периода вскрытия. Факторы, оказывающие наибольшее влияние на формирование заторов на реках бассейна Северной Двины описаны в следующем разделе.

1.3.5 Факторы образования заторов в бассейне р. Северная Двина

Выше были рассмотрены особенности физико-географического положения бассейна р. Северная Двина, его гидрография, а также закономерности водного и ледового режимов

крупных рек. Теперь можно выделить факторы, обуславливающие ежегодное формирование заторов на реках этого бассейна:

1. Преобладающее направление течения севера на юг;
2. Продолжительные зимы с формированием ледового покрова значительной мощности;
3. Характер руслового процесса (перекаты, пойменная многорукавность);
4. Высокие предледоставные уровни вследствие неустойчивой погоды в период замерзания;
5. Преимущественно адвективная весна с неустойчивым температурным режимом;
6. Временная несогласованность развития половодья на крупных притоках.

Эти факторы можно условно отнести к постоянным, т.е. определяющим сам факт наличия заторов в период вскрытия. Помимо них существует большое количество факторов, определяющих распределение заторов по длине рек в каждый конкретный год. Сложность в изучении и прогнозировании заторов (и ледовых явлений на реках вообще) состоит в том, что таких факторов очень много, они сильно изменяются год от года и действуют в различных сочетаниях. Для рек исследуемого региона можно выделить несколько факторов, которые, как правило, являются наиболее значимыми:

- 1) В период замерзания
 - ход температуры воздуха
 - количество осадков
 - расход воды
- 2) В период ледостава
 - максимальная толщина льда
 - запас воды в снеге
- 3) В период вскрытия
 - ход температуры воздуха
 - величина и интенсивность нарастания расходов воды

В общем случае факторы периода вскрытия являются главенствующими. Однако для многих рек на первый план выходят факторы периода замерзания – максимальный уровень воды в начале ледостава и зашугованность русла [4, 8].

Стоит еще раз подчеркнуть характерную для региона неустойчивость погодных условий и их большую изменчивость от года к году (особенно возросшую в последние десятилетия). Это создает дополнительную сложность при прогнозировании заторных наводнений, поскольку в разные годы на первый план могут выходить различные факторы. Так, на фоне обычно малого количества осадков в весенние месяцы изредка случаются годы,

когда количество осадков превышают норму более, чем в 3 раза. Это оказывает влияние как на характер половодья, так и на процесс таяния ледяного покрова. Другим примером могут служить годы, когда весна имеет преимущественно солярный, а не адвективный характер, и большой вклад в тепловой баланс вносит прямая солнечная радиация.

1.3.6 Заторопасные участки на реках бассейна Северной Двины

Вскрытие Северной Двины и ее крупных притоков невозможно без образования заторов [3, 8]. Различные сочетания погодных условий определяют лишь местоположение и мощность заторных образований. Всего в бассейне р. Северная Двина насчитывается 114 заторных участков, для 60-ти из которых есть данные инструментальных наблюдений [1].

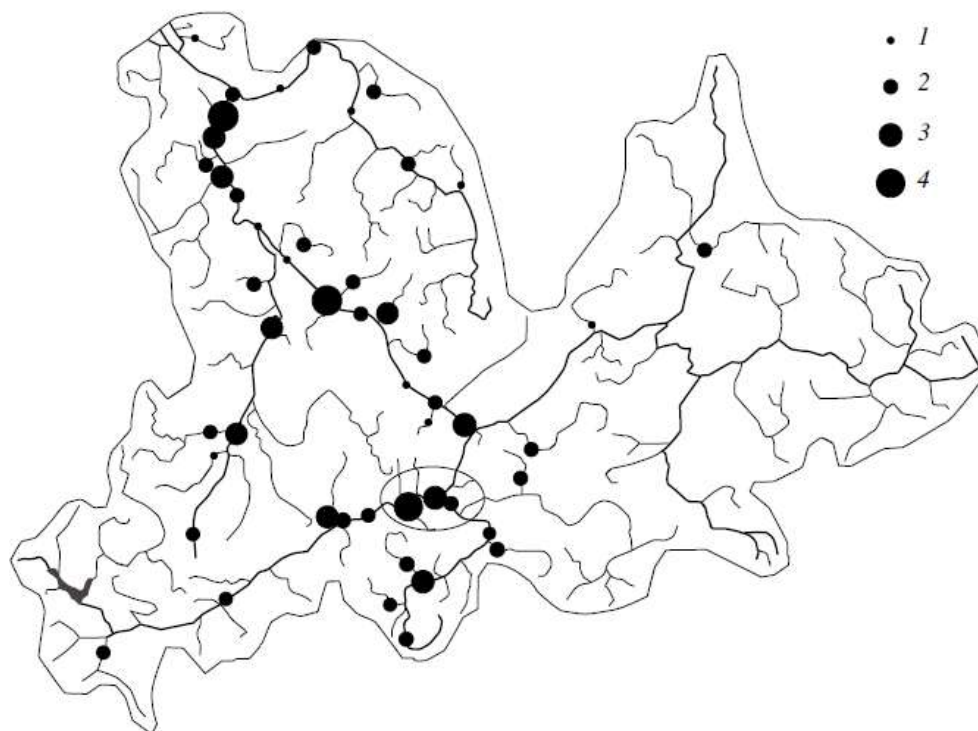


Рисунок 1.5 Повторяемость заторов в бассейне р. Северная Двина (1 – от 1 до 40 %, 2 – от 41 до 60 %, 3 – от 61 до 80 %, 4 – более 80 %) [1]

На р. Малая Северная Двина (от г. Великий Устюг до впадения р. Вычегда у г. Котлас) крупные заторы случаются часто. Они обусловлены уменьшением уклона водной поверхности [1] и большим количеством перекатов [3]. На перекатном участке сразу после слияния рек Сухона и Юг заторы образуются с большой повторяемостью, и особо крупные из них становятся причиной наводнений в городе Великий Устюг.

На участке Северной Двины от устья р. Вычегда до устья р. Вага заторы в большинстве случаев имеют транзитный характер и прорываются в течении нескольких часов [8]. Что касается участка ниже впадения р. Вага, то в годы, когда Вага вскрывается одновременно с Северной Двиной, часто образуются крупные заторы у населенных пунктов Абрамково, Нижняя Тойма, Сидоровская [8]. В годы, когда Вага вскрывается раньше, крупные заторы

образуются у с. Двинской Березник [1], поскольку энергии важской половодной волны не хватает, чтобы сломать лед на Северной Двине. Затороопасными участками также являются крутой поворот течения при впадении р. Пинега (г/п Усть-Пинега) [30] и точка разветвления Северной Двины на два рукава у с. Холмогоры [3].

В дельте р. Северная Двина крупные заторные наводнения случаются 1 раз в 3-4 года [8]. На их формирование оказывает влияние подпор уровня и нагонные ветры со стороны Белого моря. Ледокольные работы и другие меры по предотвращению заторов заметно снизили их повторяемость в главном судоходном рукаве Маймакса [1].

На р. Сухона есть большое количество заторных участков, которые приурочены к островам-осередкам и крутым поворотам русла [1]. Заторы случаются в среднем и нижнем течении ежегодно [16]. Заторы на р. Юг также наблюдаются ежегодно. Особенно часто – у с. Стрелка, где река делает крутой поворот [1]. Заторы в узле слияния Сухоны и Юга выделяются особой катастрофичностью, поскольку периодически становятся причиной наводнений в г. Великий Устюг. Как уже говорилось, основной очаг заторообразования приурочен к перекатному участку р. Малая Северная Двина сразу после узла слияния. Однако в годы, когда Юг вскрывается раньше или одновременно с Сухоней, и половодная волна последней недостаточно высока чтобы сдвинуть лед, очаг образования заторов приурочен к ее устью.

На р. Вычегда заторы льда образуются редко и не достигают большой мощности. Это связано с тем, что река имеет преимущественное направление течения с востока на запад. На р. Вага заторы случаются практически на всем протяжении с одинаковой повторяемостью [8]. Высота заторных подъемов уровня возрастает к устью, особенно в годы с высоким половодьем. Крупные заторы случаются у г. Шенкурск и у с. Усть-Сюма. На р. Пинега наиболее крупные заторы также приурочены к нижнему течению (гидростворы п. Кулогоры, д. Кузомень). Однако у д. Кузомень (нижний по течению створ) их повторяемость меньше, поскольку у п. Кулогоры река резко меняет направление течения с северного на юго-западное [8].

1.4 Климатические изменения в бассейне р. Северная Двина и их влияние на водный и ледовый режимы рек.

1.4.1 Изменения климата в бассейне по данным исследований

Результаты многочисленных исследований [4, 20, 27] свидетельствуют о том, что на протяжении последних 4-х десятилетий рассматриваемая территория подвержена изменениям климата.

Так, по данным исследования [20], средняя температура воздуха с 1976 по 2006 год на территории Архангельской области повысилась на 1.0 – 1.7 °С. Потепление в зимние месяцы

наблюдается с 1980-х годов как на севере, так и на юге Архангельской области. Весной в последние 40 лет также наблюдается закономерное повышение средней температуры воздуха, тогда как в осенние месяцы тенденция не столь однозначна. С конца 70-х годов происходит устойчивое сокращение количества морозных (со среднесуточной температурой меньше 0 °С) дней в году, причем на севере Архангельской области более значимое, чем на юге.

В рамках научно-исследовательской темы Росгидромета, посвященной заторным явлениям в бассейне Северной Двины, сотрудниками Государственного Гидрологического института была разработана геоинформационная система мониторинга гидрологического режима рек бассейна [27]. В число результатов этой работы вошел анализ наблюдающихся на рассматриваемой территории климатических изменений⁴.

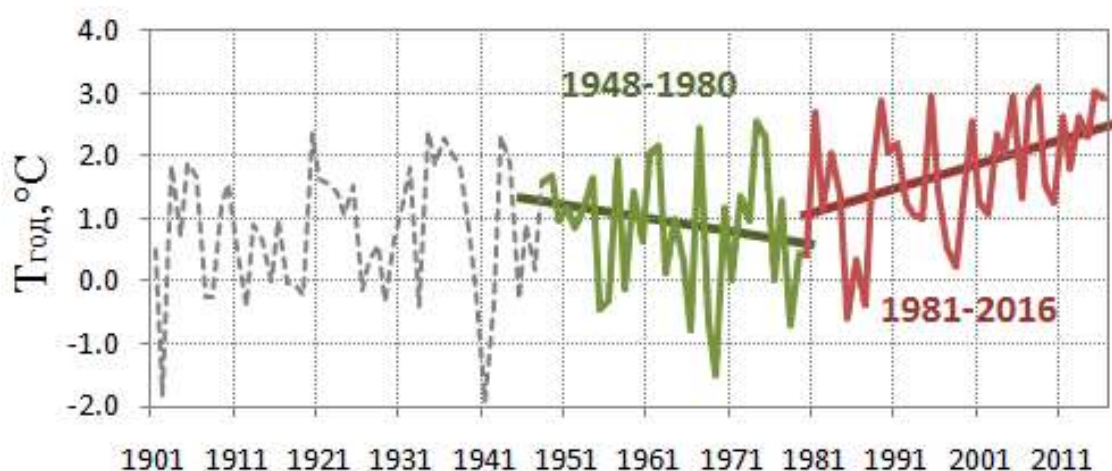


Рисунок 1.6 Колебания средней годовой температуры воздуха в бассейне р. Северная Двина за период 1901-2016 гг. [27]

Так, согласно [27], в бассейне Северной Двины с 1980х годов наблюдается отчетливо выраженная тенденция к увеличению среднегодовой температуры воздуха (рис. 1.6). При этом наиболее значительное потепление относительно «стационарного» периода (1948-1980 гг.) наблюдается в январе-марте, а наименее значительное – в августе и в ноябре (рис. 1.7). Потепление зимних месяцев более интенсивно происходит на юге (бассейны Сухоны и Юга), чем на севере. В марте максимальное потепление наблюдается в восточной части территории (бассейн верхней и средней Вычегды).

⁴ Анализ был выполнен на основе данных климатического сеточного архива CRU TS v 4.02 [27]

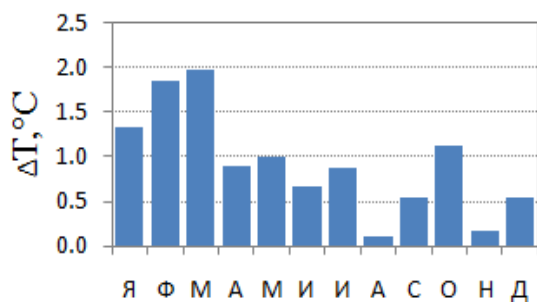


Рисунок 1.7 Изменение средней температуры воздуха по месяцам за период 1981-2016 гг. по сравнению с периодом 1948-1980 гг. [27]

Помимо значений температуры воздуха в работе [27] были проанализированы суммы дней с отрицательной температурой воздуха за различные сезоны. В результате был получен интересный вывод: количество морозных дней наиболее значительно уменьшилось (по сравнению со «стационарным» периодом) осенью и весной. Это свидетельствует о том, что продолжительность холодного периода в регионе сокращается.

В многолетней изменчивости годового количества и внутригодового распределения осадков гораздо труднее выявить какие-либо закономерности. Осадки, в отличие от температуры воздуха, не образуют непрерывного поля, и их пространственно-временное распределение подчиняется более сложным природным механизмам. Попытка выявить и охарактеризовать изменения режима выпадения осадков в многолетнем разрезе, сделанная в работе [27], дала некоторые результаты. Согласно полученным выводам, в бассейне р. Северная Двина в последние десятилетия наблюдается увеличение количества осадков зимой (в декабре-феврале). В остальные сезоны суммы осадков по сравнению со «стационарным» периодом изменились незначительно. Другим интересным выводом стало то, что наиболее существенное увеличение годовых сумм осадков наблюдается в восточной, континентальной, части бассейна.

1.4.2 Изменения водного режима рек

Изменения водного режима крупных рек севера ЕТР, обусловленные наблюдающимся потеплением климата, невелики. В работе [32] указано, что изменения характеристик как весеннего половодья, так и меженного стока р. Северная Двина находятся в пределах естественной многолетней изменчивости. Авторами [32] были рассмотрены ряды таких характеристик, как объем, максимальный уровень, дата начала и продолжительность весеннего половодья, а также минимальный 30-дневный расход летней межени за период 1880-2010 гг. Результаты анализа не дали достаточных оснований говорить о наличии каких-либо многолетних тенденций. Авторы отмечают лишь смещение дат начала половодья в сторону более ранних, а также некоторое увеличение расходов летней межени в последние 30-40 лет (с середины 1980х годов).

Анализ изменений внутригодового распределения стока р. Северная Двина в работе [13] показал, что в «современный» период (1975-2015 гг.) наблюдается незначительное его перераспределение (в пределах 7 %). Последнее выражается в увеличении весеннего стока

(апрель-июнь) за счет уменьшения летне-осеннего (июль-ноябрь). Доля зимнего стока при этом остается практически неизменной. Эти результаты не вполне соответствуют другим выводам относительно перераспределения стока на реках бассейна р. Северная Двина [2], и, в частности, полученным в настоящем исследовании. Это может быть связано с различиями при определении границ периодов для сравнения.

1.4.3 Изменения ледового режима рек

Наиболее чутко на изменения внешних условий реагирует ледовый режим рек. Действительно, результаты большого количества исследований подтверждают, что за последние 4 десятилетия он изменился значительно на большинстве крупных рек региона [4, 14, 27].

По результатам проверки многолетних рядов различных характеристик ледового режима на однородность по критериям Стьюдента и Фишера, выполненной в работе [27], можно говорить о том, что наиболее ярко влияние потепления климата сказывается на сроках и продолжительности ледостава. Последняя сокращается на самой Северной Двине и всех ее крупных притоках (табл. 1.1). В среднем по бассейну продолжительность ледостава за последние 3-4 десятилетия сократилась на 7-10 дней по сравнению с периодом 1950-1987 гг. [27].

Результаты анализа многолетних изменений ледового режима в нижнем течении Северной Двины [4] подтверждают этот вывод. Отмечается, что даты установления льда сместились (по сравнению с периодом 1961-1990 гг.) на 10 дней в сторону более поздних, а даты вскрытия на 4-5 дней в сторону более ранних. Со-направленные изменения наблюдаются в низовьях других крупных рек Арктической зоны ЕТР (Онега, Мезень, Печора). Количественные оценки сокращения периода ледостава на реках бассейна и региона несколько разнятся в различных исследованиях. Связано это, прежде всего, с различиями в определении условной границы между «стабильным» периодом и периодом с климатическими изменениями.

Таблица 1.1 Сравнение средней продолжительности периода ледостава за «стационарный» период (1950-1987 гг.) и период с климатическими изменениями (1988-2016 гг.) на крупных реках бассейна Северной Двины [27]

Река-Пункт	Период	
	1950-1987	1988-2016
Сухона - д. Каликино.	154	136
Сухона - г. Тотьма	141	133
Сухона - г. Великий Устюг	156	142
. Северная Двина - г. Котлас	150	145
Вычегда - Малая Кужба	160	154
Вычегда - г. Сторожевск	174	163
Вычегда - г. Сыктывкар	166	159
Вага - г. Шенкурск	153	146
Вага - д. Усть-Сюма	154	141
. Пинега - д. Засурье	174	159
. Пинега - д. Усть-Покшеньга	171	154
Пинега - д. Кулогоры	174	158
р. Северная Двина - г. Котлас	150	145

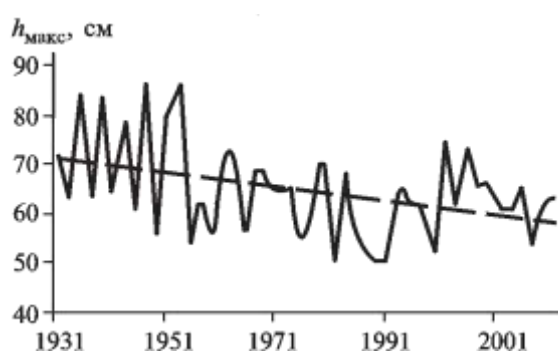


Рисунок 1.8 Изменение аномалий максимальной толщины льда на р. Северная Двина – г/п Котлас [2]

Наблюдаемое потепление зимнего периода приводит к уменьшению толщины льда, накапливаемой к началу таяния. Эта тенденция наблюдается на всех крупных реках бассейна. При этом она не является значимой (по критериям Стьюдента и Фишера) [27]. В среднем за период 1991-2007 гг. по сравнению с периодом 1961-1990 гг. средняя толщина льда изменилась не более, чем на 10 см [2]. При этом,

как будет показано ниже, наблюдаемая степень изменения этой характеристики уже достаточна, чтобы повлиять на заторную обстановку в регионе.

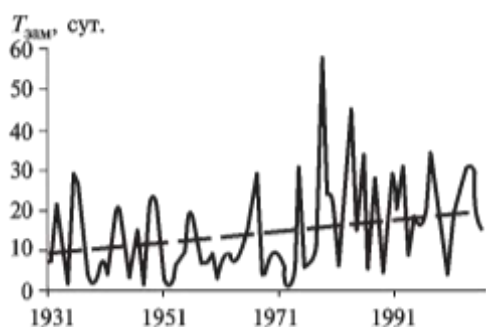


Рисунок 1.9 Продолжительность периода замерзания Северной Двины, г/п Усть-Пинега [15]

Еще одним важным аспектом влияния климатических изменений на ледовый режим рек является увеличение продолжительности периода замерзания [4]. Увеличение количества и продолжительности оттепелей в начале холодного периода приводит к формированию снегодождевых паводков, значительной зашугованности русла и установлению ледостава при высоких уровнях [2]. Эти тенденции наблюдаются на большинстве рек арктической зоны ЕТР, что весьма неблагоприятно для инфраструктуры региона, а также способствует формированию заторов льда в период вскрытия. Можно попутно отметить, что в западной и восточной Сибири, наблюдаются сопоставимые изменения и в ближайшем будущем ожидается значительное увеличение повторяемости зажоров [8].

1.4.4 Влияние наблюдаемых изменений на образование заторов

Поскольку ледовая обстановка очень важна для социально-экономического благополучия территории и безопасности населения, влияние климатических изменений на повторяемость опасных ледовых явлений в регионе неоднократно становилось предметом исследований [2, 27]. Что касается заторов льда, то влияние климатических изменений на их повторяемость и мощность на разных участках рек может быть весьма различно, поскольку каждый затороопасный участок характеризуется уникальными гидравлико-морфометрическими условиями. Попробуем, однако, сделать некоторые обобщения.

Наиболее важным для гидроэкологической безопасности аспектом наблюдаемых изменений является увеличение продолжительности периода замерзания в сочетании с большой интенсивностью шугообразования и высокими предледоставными уровнями. Эти явления сами по себе являются неблагоприятными. Густой шугоход и осенний ледоход большой продолжительности, а также повторные вскрытия рек, лимитируют как период судоходства, так и период функционирования зимних дорог и переправ через реки [2]. В качестве примера негативных последствий аномально теплой зимы можно привести 2006 год, когда в результате зимнего вскрытия реки Малая Северная Двина возникла угроза повреждения автомобильного моста в г. Котлас [3].

Кроме того, как неоднократно говорилось выше, высокие предледоставные уровни в сочетании с большой зашугованностью русла являются фактором, способствующим образованию заторов. Участки, где осенью наблюдались зажоры, весной часто становятся

очагами затороформирования. Согласно результатам работы [7], вследствие климатических изменений в последние 4 десятилетия детерминированный вклад максимальных уровней периода ледостава в процесс образования заторов на р. Малая Северная Двина изменился от 0.13 (за 1950-1972 гг.) до 0.87 у г. Великий Устюг и от 0.03 до 0.53 у д. Медведки. В работе [8] утверждается, что изменение детерминированных вкладов факторов затороформирования в пользу характеристик периода замерзания происходит на многих реках как ЕТР, так и других регионов.

Другой аспект влияния климатических изменений на образование заторов – уменьшение максимальной толщины льда. Как отмечается в работе [8], в общем случае, это способствует уменьшению повторяемости заторов на реках. При малой толщине льда необходимый для вскрытия расход уменьшается, и энергии водного потока может быть достаточно, чтобы сломать лед на большом протяжении. Однако, по мнению исследователей в работе [3], это может повлечь увеличение повторяемости заторов в низовьях и устьях рек. Кроме того, необходимо также учитывать наблюдающуюся тенденцию к уменьшению весеннего стока [2]. В общем случае, небольшие расходы воды весеннего половодья снижают вероятность образования заторов, поскольку открывают возможность к тепловому вскрытию реки. Так, на реках или участках рек, для которых образование большого количества шуги в русле по тем или иным причинам нехарактерно, вероятно, будет наблюдаться снижение повторяемости заторов. Однако таких рек (из числа крупных) на территории ЕТР меньшинство.

Подводя итог, можно сделать вывод, что влияние климатических и гидрологических изменений на заторную обстановку в бассейне р. Северная Двина имеет неоднозначный характер. Наблюдаемые тенденции оказывают разнонаправленный эффект на повторяемость заторов, и потому могут частично уравнивать друг друга. Так, на участках, не подверженных сильному антропогенному вмешательству в ледовый режим, повторяемость заторов в настоящее время остается практически неизменной [8]. Однако при сохранении наблюдающихся тенденций можно ожидать, что участках рек с интенсивным зажорообразованием повторяемость заторов увеличится. Стоит еще раз подчеркнуть, что очень многое зависит от конкретных гидравлических условий на каждом участке.

Учитывая сложность и многофакторность процесса, его чуткость к флуктуациям погодных условий, а также стремительность происходящих климатических изменений, даже наличие большого исследовательского опыта не позволяет с уверенностью делать долгосрочные прогнозы на ближайшие десятилетия. Необходим постоянный мониторинг водного и ледового режима и анализ вновь поступающих данных, а также разработка надежной системы прогнозирования, адаптированной к нестабильности климата.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В БАССЕЙНЕ РЕКИ МАЛАЯ СЕВЕРНАЯ ДВИНА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЗИМНИЙ И ВЕСЕННИЙ СТОК, А ТАКЖЕ НА ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ РЕК

2.1 Факторы формирования заторов в узле слияния рек Сухона и Юг

В среднем и нижнем течении р. Сухона на участке от г. Тотьма до устья заторы случаются почти ежегодно [16]. Однако наиболее опасными являются заторы, приуроченные к месту слияния р. Сухона с р. Юг. Они обуславливают максимальные уровни весеннего половодья в 57 % случаев (наивысший показатель по всему бассейну Северной Двины). От вызванных ими наводнений страдает г. Великий Устюг. За всю историю инструментальных наблюдений в городе произошло более 30 наводнений [23], из которых 11 были особенно крупными и принесли огромный экономический ущерб [16] (рис. 2.1).

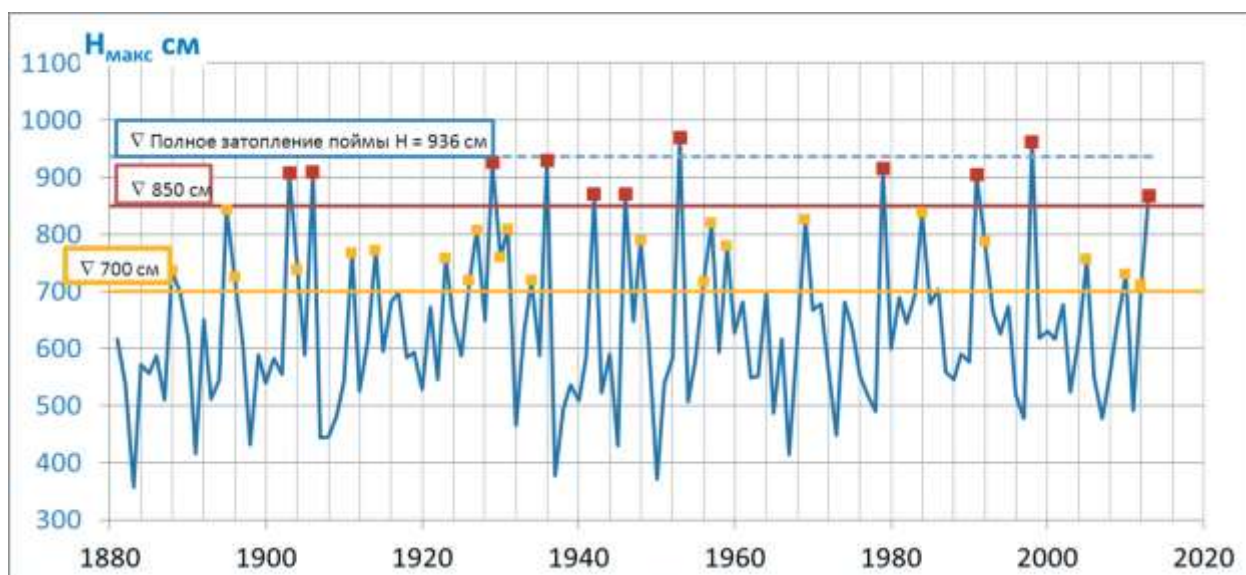


Рисунок 2.1 Ход максимальных уровней весеннего половодья по г/п Великий Устюг [16]

Ежегодное образование заторов в узле Сухона – Юг – Малая Северная Двина обусловлено сочетанием большого количества благоприятных для этого условий. В первую очередь стоит упомянуть морфометрию участка (рис. 2.2). Голова крупных заторов, вызывающих подъем уровня у г. Великий Устюг до катастрофических отметок, как правило, формируется на перекатном участке большой протяженности сразу после слияния Сухоны и Юга до д. Аристово [3]. Вторым очагом заторообразования является сам узел слияния. Там заторы формируются, когда прохождение ледохода на р. Юг начинается одновременно с ледоходом на р. Сухона или немного раньше него [3, 8], и энергии половодной волны на Сухоне не хватает, чтобы вытолкнуть лед в Малую Северную Двину.

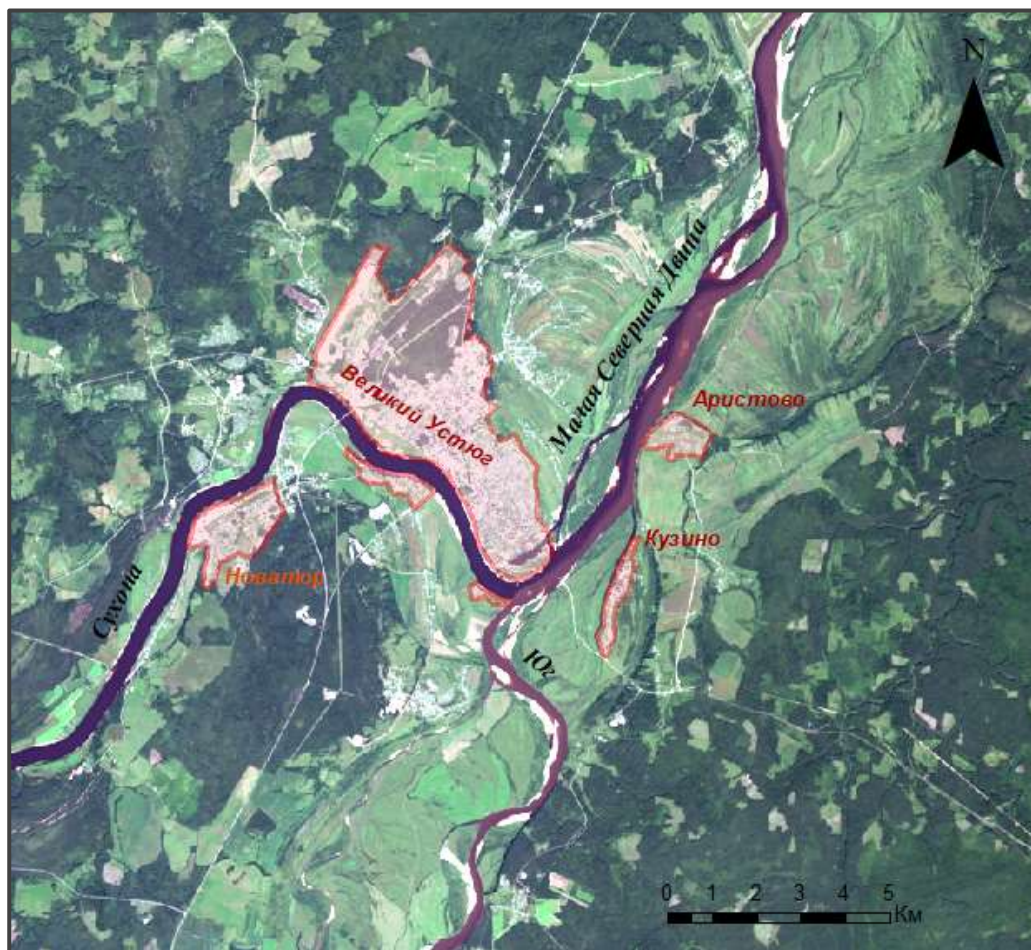


Рисунок 2.2 Узла слияния рек Сухона и Юг на синтезированном спутниковом снимке

Важнейшими факторами образования заторов на рассматриваемом участке являются метеорологические и гидрологические факторы. Согласно исследованиям [7, 16], крупным заторам часто предшествует замерзание реки при высоких уровнях с большим количеством шуги в русле. Формирование таких условий замерзания обеспечивается неустойчивой температурой воздуха с переходами через 0°C и выпадением осадков. Это формирует повышенный сток с прохождением снегодождевых паводков [7,16]. Чередование периодов похолодания и потепления в процессе замерзания реки способствует образованию в русле большого количества шуги и обломков льда, что приводит к формированию зажоров. Последние часто сохраняются на протяжении всей зимы и в период вскрытия становятся очагами заторообразования [8].

Погодные условия периода ледостава, как правило, не выделяются в качестве ведущего фактора. Однако они косвенно учитываются, когда речь идет о величине расходов воды на момент вскрытия. Весенние расходы зависят как от запаса воды в снеге, накопленного за зиму, так и от глубины промерзания почвы [5]. Что касается максимальной толщины льда, которая зависит от температурного режима в зимний период, то ее вклад в формирование заторов на рассматриваемом участке незначителен, как будет показано ниже.

Погодные условия в период подготовки рек к вскрытию являются важнейшим фактором, во многом определяющим заторную обстановку в бассейне р. Малая Северная Двина [3]. Режим температуры воздуха в марте и апреле определяет как интенсивность нарастания расходов воды, так и скорость деградации ледового покрова. В отдельных случаях, значение могут иметь такие факторы как скорость ветра, количество жидких осадков, характер облачности в подготовительный период [8]. Однако их вклад, как правило, не учитывается.

В работе [26] приведены коэффициенты корреляции показателей основных факторов заторообразования у г. Великий Устюг с максимальным уровнем воды в этом створе (табл. 2.1). Показано, что основной вклад в формирование заторов на этом участке вносят следующие факторы: величина расхода воды (показатель фактора – расход воды в информационных створах в различные сроки), интенсивность подъема уровня (максимальная, в створе г. Великий Устюг или в информационных створах), максимальный уровень в начале ледостава и количество шуги в русле (косвенный показатель – минимальный уровень за период ледостава). Максимальная толщина льда, накопленная за зимний период, не влияет на формирование заторов на рассматриваемом участке. Вклад показателей температурного режима в подготовительный к вскрытию период невелик.

Таблица 2.1 Парные коэффициенты корреляции максимальных заторных уровней воды р. Сухона у г. Великий Устюг с количественными показателями факторов их формирования [26]

№ п.п.	Показатели факторов	r
<i>Осенне-зимние факторы</i>		
1	Максимальный уровень воды Сухоны в начале ледостава	0,45
2	Разность максимальных ледоставных уровней воды у д. Каликино и г. Великий Устюг	0,02
3	Минимальный ледоставный уровень воды Сухоны	0,46
4	Максимальная толщина ледяного покрова	-0,01
5	Максимальная высота снежного покрова на м/ст. Тотьма	0,04
<i>Весенние факторы</i>		
6	Сумма температур за подготовительный период	0,10
7	Средняя температура воздуха за подготовительный период	0,15
8	Максимальный расход воды р. Ёма у д. Новое до даты превышения максимального ледоставного уровня у Великого Устюга	0,43
10	Сумма расходов воды р. Ёма до даты превышения максимального ледоставного уровня у Великого Устюга	0,57
11	Максимальная интенсивность подъема уровня воды Сухоны у г. Тотьма	0,32
12	Уровень воды Сухоны в первый день ледохода у г. Тотьма	0,40
13	Расход воды в первый день ледохода у г. Тотьма	0,40
14	Максимальный заторный уровень воды у г. Тотьма	0,64
15	Максимальная интенсивность подъема уровня воды Сухоны у г. Великий Устюг	0,28
16	Температура воздуха на дату заторного максимума уровня в Великом Устюге	-0,04

В связи с наблюдающимся в регионе потеплением климата происходит изменение погодных условий на территории бассейна. Это не может не сказаться на ледовом режиме рек. Как уже отмечалось выше, по причине увеличения количества оттепелей в осенне-зимний период на большинстве рек ЕТР наблюдается увеличение продолжительности периода замерзания. При этом характерны позднеосенние паводки, повторные вскрытия, а также значительная зашугованность русел и увеличение повторяемости зажоров.

Это привело к изменению вкладов перечисленных выше факторов в формирование максимального заторного уровня воды. Для р. Малая Северная Двина эти вклады были уточнены в работе [7] (табл. 2.2). По результатам расчетов было выявлено, что у г. Великий Устюг за период 1973-2016 гг. значительно увеличился вклад максимального уровня периода ледостава, вплоть до того, что этот фактор стал определяющим. Разумеется, этот результат не

в полной мере отражает физическую природу явления образования заторов, однако позволяет составлять достаточно точные долгосрочные и краткосрочные прогнозы максимальных уровней у г. Великий Устюг.

Таблица 2.2 Изменение детерминированных вкладов аргументов эмпирических зависимостей для прогноза максимальных заторных уровней воды на р. Сухона – г.Великий Устюг [7]

Река – пункт	Период наблюдений	Максимальный уровень за период ледостава, см	Максимальная толщина льда, см	Расход воды на дату выпуска прогноза, м ³ /с	Температура воздуха на дату выпуска прогноза, °С
Сухона – г. В. Устюг	1950-1972	0,13	0,07	0,80	0
	1973-2016	0,87	0	0,13	0

Значимость условий периода замерзания для формирования заторов подтверждается исследованиями, выполненными с использованием нейронных сетей [3, 24]. Для участка рек Сухона и Малая Северная Двина у г. Великий Устюг наилучшая оправдываемость прогнозов максимального заторного уровня была получена при использовании в качестве предикторов характеристик периода замерзания (уровни воды при установлении ледостава, продолжительность ледохода) в сочетании с характеристикой периода ледостава (сумма отрицательных температур за зимний период) [3]. Для прогноза заторной составляющей максимального уровня дополнительно были использованы данные о толщине льда и расходах воды перед вскрытием [3]. Так, в отличие от результатов корреляционного анализа, описанных выше, опыт построения нейронных сетей свидетельствует о том, что толщина льда перед вскрытием является фактором формирования заторов у г. Великий Устюг. Косвенно на нее влияют как погодные условия периода ледостава, так (и в особенности) погодные условия подготовительного к вскрытию периода.

Как видно из вышеизложенного, процесс формирования заторов в узле слияния рек Сухона – Юг – Малая Северная Двина привлекает внимание исследователей и весьма разносторонне изучен. Методики прогнозирования заторных максимумов уровня существуют и продолжают активно совершенствоваться. Однако, несмотря на это, меры по предотвращению заторных наводнений далеко не всегда достигают цели.

В бассейне р Сухона проводится большое количество превентивных мероприятий. К их числу относятся ледовзрывные работы, распилы льда, чернение и др. [33]. Оценки влияния этих мероприятий на формирование заторов неоднозначны [3, 7, 8]. Стоит также отметить, что в последние десятилетия в связи с прекращением судоходства на участке г. Котлас – г. Великий Устюг (р. Малая Северная Двина) были остановлены дноуглубительные работы. Согласно рекомендациям, сделанным по итогам системного анализа в работе [23], дноуглубительные и русловыпрямительные работы должны входить в число основных

противозаторных мер на рассматриваемом участке. Однако этот вопрос остается спорным, потому что в исследовании не был дан прогноз изменения руслового процесса в результате предложенных мер.

В условиях изменения климата изучение и прогнозирование заторов и связанных с ними опасных гидрологических явлений, а также рациональное планирование превентивных мер, становится особенно актуальным. Для своевременного уточнения существующих методик прогнозирования, а также для разработки новых, адаптированных к климатической нестабильности, необходим постоянный мониторинг происходящих в регионе изменений. Мониторинг в этом случае должен включать в себя комплекс стационарных метеорологических наблюдений с последующим анализом изменения конкретных характеристик в многолетнем разрезе, оценку величины и интенсивности происходящих изменений, а также выявление влияния их на гидрологический режим водных объектов.

2.2 Анализ климатических изменений в бассейне р. Малая Северная Двина

2.2.1 Цели и задачи исследования

Основной целью этого этапа исследований была оценка величины и интенсивности изменений климата, которые прямо или косвенно влияют на формирование заторов у г. Великий Устюг. Для осуществления поставленной цели были решены следующие задачи:

- сбор и первичная обработка исходной метеорологической информации;
- выбор методики исследования;
- анализ метеорологических данных;
- обобщение полученных результатов.

2.2.2 Исходные данные

На образование заторов в узле слияния рек Сухона и Юг (а также на р. Малая Северная Двина ниже по течению) оказывает влияние совокупность характеристик их гидрологического режима. Поэтому климатические изменения на территориях бассейнов этих двух рек рассматривались отдельно. Так, анализ климатических изменений был выполнен для трех территориальных единиц: бассейнов р. Сухона (метеостанции Вологда и Тотьма), р. Юг (метеостанции Никольск и Опарино) и р. Малая Северная Двина (все перечисленные метеостанции).

Источником метеорологической информации стали данные наблюдений на станциях и постах сети Роскомгидромета, доступные на сайте www.meteo.ru (официальный сайт ВНИИГМИ-МЦД) [9, 10]. Рассматриваемый период составил 58 лет (с 1958 по 2017 гг.). Его границы обусловлены в первую очередь наличием всех необходимых данных.

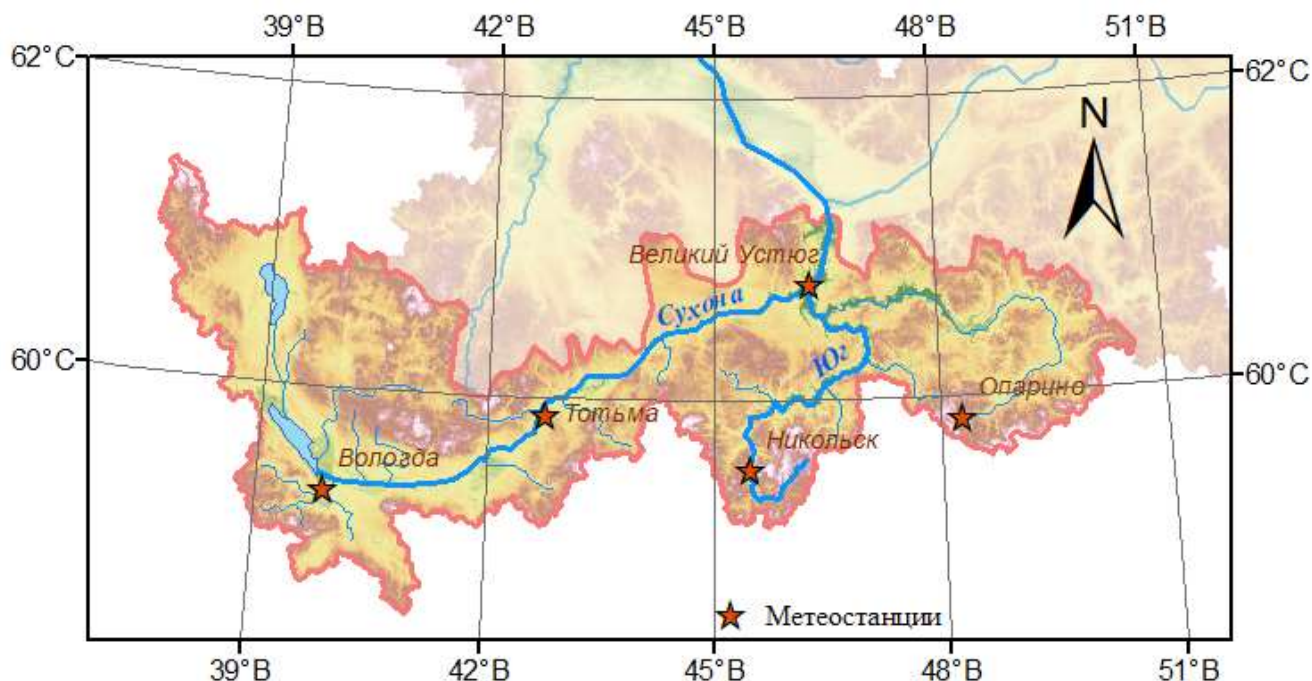


Рисунок 2.3 Бассейн р. Малая Северная Двина с метеостанциями, данные которых были использованы в исследовании

2.2.3 Методика исследования

Анализ изменений климата был основан на оценке изменений следующих характеристик, определяемых для каждого года из рассматриваемого периода:

- 1) Суммарное количество дней с положительной температурой воздуха ($> 0^{\circ}\text{C}$);
- 2) Суммарное количество жидких осадков;
- 3) Максимальный среднемесячный запас воды в снеге.

Все эти характеристики определялись для холодного периода года (с ноября по март, включительно). Выбор характеристик основывался на следующих предположениях:

- на них отражается тенденция к потеплению холодного периода, которая была отмечена на территории рассматриваемого региона в многочисленных исследованиях (результаты которых описаны выше);
- они являются количественными показателями климатических факторов формирования стока в холодный период;
- от них в значительной степени зависит максимальная за зиму толщина льда и объем стока весеннего половодья.

Изменения факторов формирования стока в начале холодного периода (ноябрь-декабрь) в данном случае особенно важны. Они определяют, при каких условиях будет происходить замерзание рек. Как уже отмечалось выше, в период нестабильности климата характеристики

периода замерзания (предлежавший уровень, зашугованность русла) стали ведущими для формирования заторов на рассматриваемом участке.

Оценка интенсивности изменений рассматриваемых характеристик выполнялась через оценку значимости линейных трендов многолетней изменчивости. Значимость трендов определялась по методике, изложенной в [25], при уровнях $\alpha = 5\%$ и $\alpha = 1\%$.

Количественно интенсивность изменений характеризовалась через значение тренда. В случае, если в многолетнем ряду значений той или иной характеристики визуально можно было выделить условно «стационарный» период и период с ярко выраженными изменениями, величина тренда рассчитывалась отдельно для каждого из этих периодов. В этом случае также рассчитывалась разница средних значений характеристики за каждый период.

2.2.4 Результаты

По результатам анализа было выявлено, что количество дней с положительной температурой воздуха увеличивается на протяжении всего рассматриваемого периода (1958-2017 гг.), причем наиболее значительно – в феврале и марте (рис. 2.4). Положительные тренды достигают уровня 99 % значимости. При этом в бассейне р. Сухона изменения более интенсивны, чем в бассейне р. Юг.

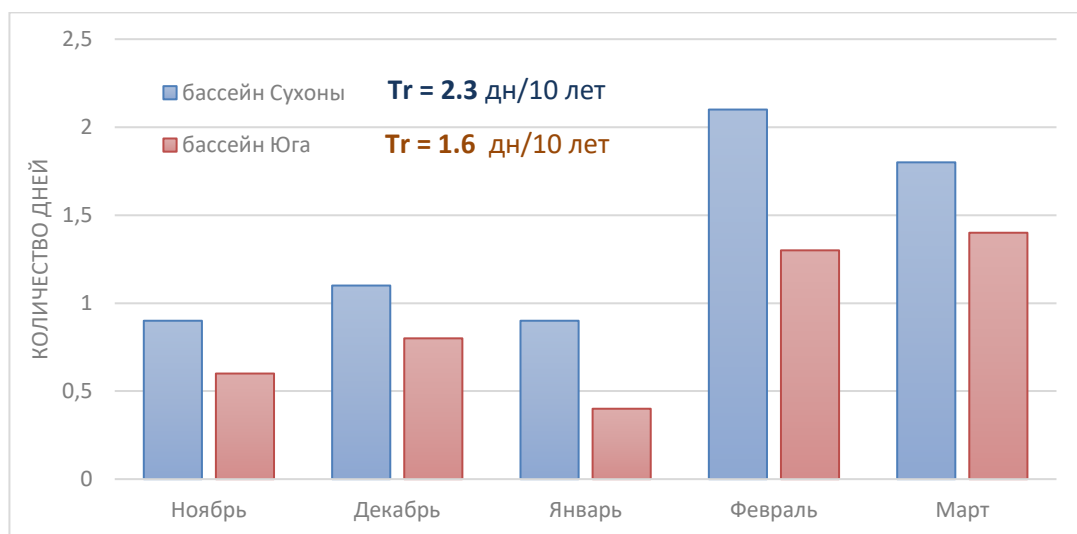


Рисунок 2.4 Приращение количества дней с положительной температурой воздуха в холодный сезон в бассейнах рек Сухона и Юг за период 1988-2017 гг. по сравнению с периодом 1958-1987 гг.

Сумма жидких осадков за холодные месяцы также возрастает, причем значимость тренда значительно увеличилась, начиная с 1988 г. (табл. 2.3). Тенденция заметна как по максимальным, так и по минимальным значениям (рис. 2.5). Увеличение количества жидких осадков связано, в основном, с увеличением количества безморозных дней (коэффициент

корреляции - 0.74). В период 1988-2017 гг. (относительно периода 1958-1987гг.) наибольший рост сумм осадков отмечен в зимние месяцы: в декабре в 2 раза, в январе в 3 раза, в феврале более чем в 7 раз. По абсолютной величине наибольшее увеличение количества осадков наблюдается в марте (разница средних сумм за два периода – 3.5 мм), наименьшее – в январе (разница 2.2 мм).

Таблица 2.3 Изменение количества жидких осадков в период с 1958 по 2017 гг.

		Ема – Новое	Сухона – Каликино	Юг – Кич. Городок	Сухона – Вел. Устюг
Тренд (мм/10 лет) за весь период		5.1	5.1	5.0	5.0
До 1987	Среднее значение, мм	33.3	33.2	25.0	27.3
	Тренд (мм/10 лет)	1.2	2.7	4.4	3.7
С 1988	Среднее значение, мм	49.3	47.5	40.1	41.6
	Тренд (мм/10 лет)	<u>7.6</u>	9.2	5.6	<u>7.9</u>

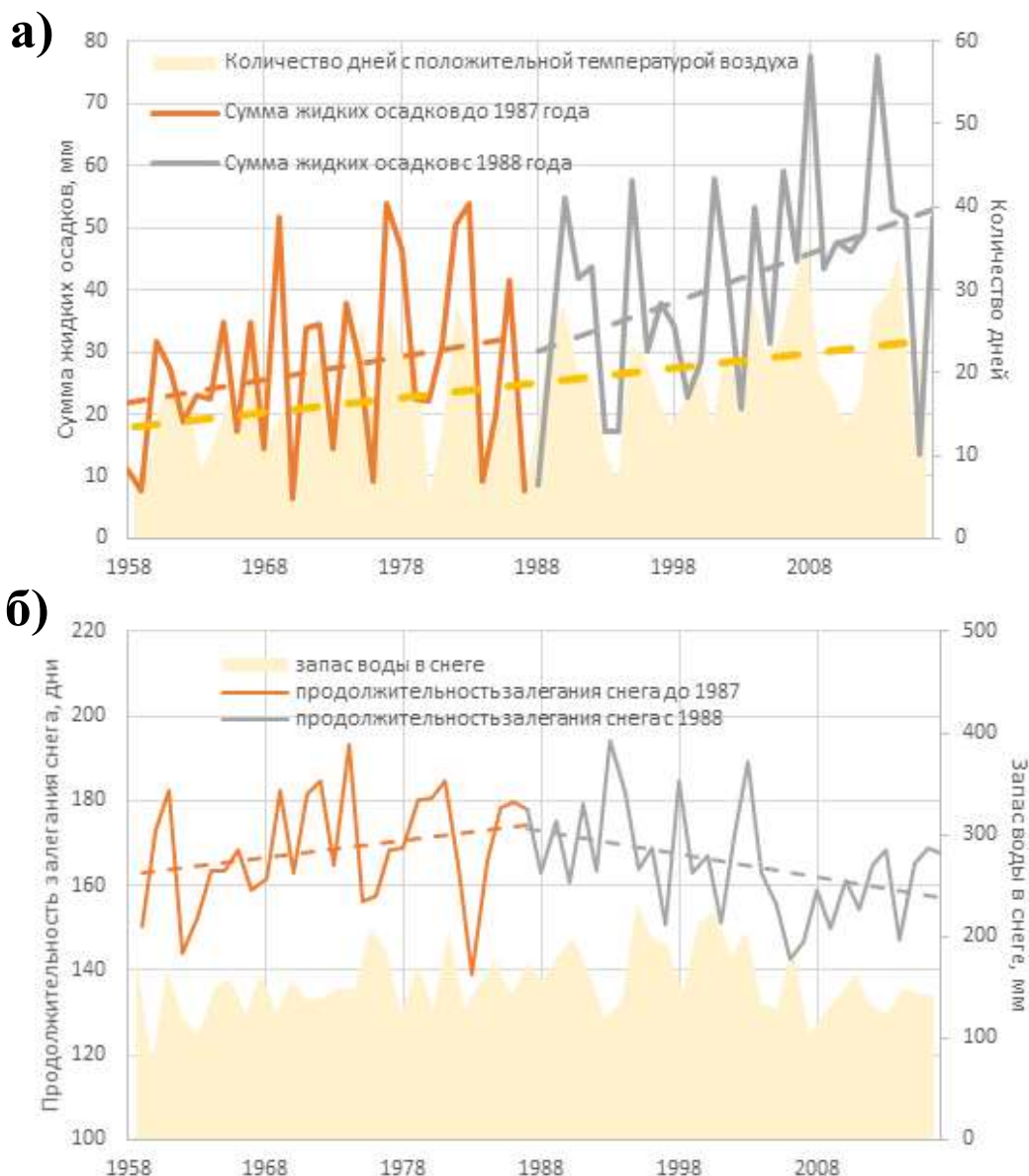


Рисунок 2.5 Изменение климатических характеристик холодного периода в бассейне р. Малая Северная Двина за период 1958-2017 гг. (а – изменение количества дней с положительной температурой воздуха и сумм жидких осадков; б – изменение продолжительности залегания снежного покрова и максимального запаса воды в снеге)

В таблице 2.4 приведен анализ изменений продолжительности залегания снежного покрова, который показал, что наблюдавшаяся до конца 1980-х годов тенденция к ее увеличению сменилась на обратную (рис. 2.5). В последние 10 лет продолжительность залегания снега находится на уровне минимальных значений за предшествующий период. Изменения, наблюдающиеся в бассейне реки Сухона, более значительны, чем в бассейне реки Юг.

Таблица 2.4 Изменение характеристик снежного покрова в период 1958-2017 гг.

		Ема – Новое	Сухона – Каликино	Юг – Кич. Городок	Сухона – Великий Устюг
Тренд SWE (мм/10 лет) за весь период		-2.3	-2.3	2.8	3.1
Продолжительность залегания снега, тренды (дней/10 лет)	До 1987	3.9	2.5	4.9	4.1
	С 1988	-10.1	<u>-7.2</u>	-2.6	<u>-5.1</u>

Что касается максимального запаса воды в снеге, четко выраженной тенденции его многолетних изменений в бассейне Малой Северной Двины не наблюдается. При этом для бассейна р. Сухона тренд положительный, а для бассейна р. Юг – отрицательный (табл. 2.4). Хотя тренды не достигают уровня статистической значимости, изменения нельзя считать незначительными. Так, в бассейне р. Сухона средний максимальный запас воды в снеге за последние 10 лет (2007-2016 гг.) составил лишь 82 % от среднего за «стабильный» период (1958-1987 гг.).

2.2.5 Выводы

По результатам анализа климатических изменений в бассейне р. Малая Северная Двина – г. Великий Устюг можно сделать следующие выводы:

1. Значительное изменение климата (в сторону его потепления) в рассматриваемом бассейне началось во второй половине 1980х годов и продолжается в настоящее время;
2. В продолжение этого периода в бассейне происходит значимое увеличение количества дней с положительной температурой воздуха и количества жидких осадков в холодный период года (с ноября по март), а также сокращение периода залегания снежного покрова;
3. Наблюдаемые климатические изменения имеют большую интенсивность в бассейне р. Сухона, чем в бассейне р. Юг;
4. В бассейне р. Сухона происходит уменьшение максимальных запасов воды в снеге, тогда как в бассейне р. Юг, наоборот, наблюдается их незначительное увеличение.

2.3 Влияние климатических изменений на зимний и весенний сток рек в бассейне р. Малая Северная Двина

2.3.1 Цели и задачи исследования

Цель этого этапа исследований – выявить и охарактеризовать реакцию водного и ледового режимов рек на происходящие климатические изменения. Качественная и количественная оценка этой реакции в соотнесении с результатами исследования климатических изменений, представленными выше, даст теоретическую основу для разработки прогнозных методик, адаптированных к условиям нестабильности климата, а также для рационального планирования противозаторных мероприятий. Для реализации поставленной цели потребовалось выполнение следующих задач:

- сбор и обработка первичной информации,
- выбор методики исследования,
- анализ информации в соответствии с выбранной методикой,
- формулирование выводов.

2.3.2 Исходные данные

Сложность выявления влияния климатических факторов на зимний сток рек заключается в том, что основную роль в формировании стока в это время года играет подземное питание. Влияние погодных условий проявляется эпизодически, например, в кратковременном увеличении расходов воды в случае достаточно продолжительной оттепели. Выявить связь зимнего стока с изменениями климатических факторов в многолетнем разрезе можно, рассматривая сток малых рек. Величина их грунтового питания, как правило, невелика, и на флуктуации погодных условий они реагируют более ярко и однозначно, чем средние и, тем более, крупные реки. Поэтому, по аналогии с другими створами были рассмотрены изменения водного и ледового режима малой реки Ема (пост д. Новое). Эта река принадлежит бассейну верхней Сухоны (рис. 2.6). Анализ изменений ледового и водного режима рек был выполнен по данным четырех гидрометрических постов (табл. 2.5, рис. 2.6). Источником информации послужили данные Государственного водного кадастра [18, 19].

Таблица 2.5 Характеристики исследуемых водосборов

Река – пост	Тип поста	Площадь бассейна
р. Ема – д. Новое	Расходный	179 км ²
р. Сухона – д. Каликино	Расходный	49200 км ²
р. Юг – с. Кичменгский Городок	Расходный	8890 км ²
р. Сухона – г. Великий Устюг	Уровеньный	50300 км ²

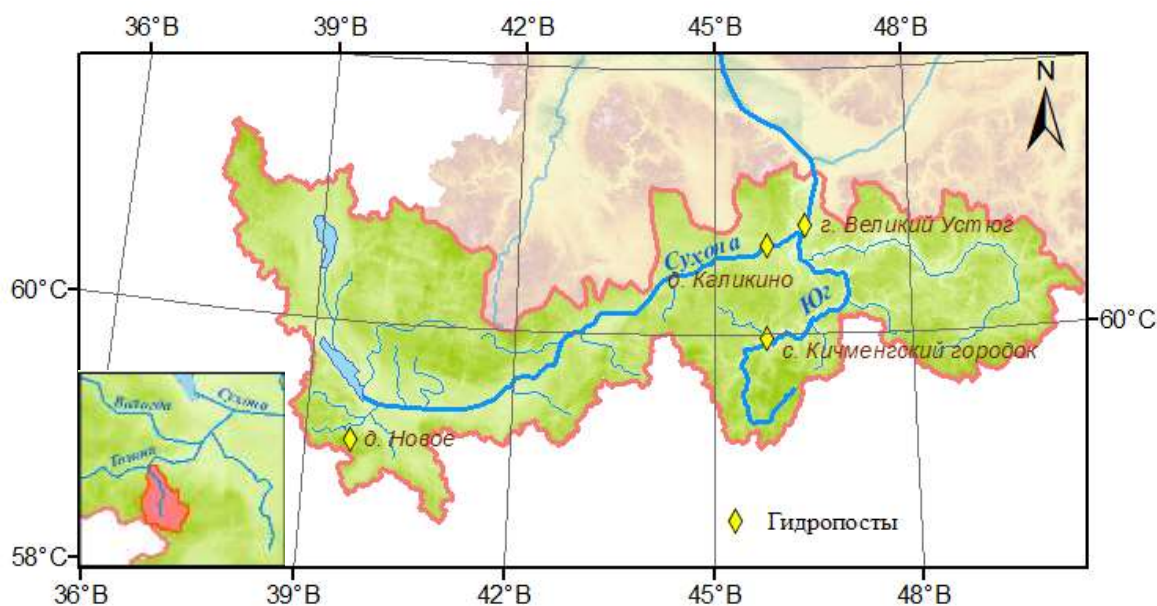


Рисунок 2.6 Бассейн р. Малая Северная Двина с гидропостами, данные которых были использованы в исследовании (на врезке уточнено расположение бассейна р. Ема)

В качестве характеристик ледового режима рек были приняты даты начала и окончания ледостава, продолжительность ледостава и максимальная за зимне-весенний период толщина льда. Анализ изменений водного режима был выполнен по среднемесячным расходам воды (с ноября по май, включительно) отдельно для зимнего и весеннего периодов. Для анализа многолетних изменений уровня режима использовались максимальные уровни весеннего половодья.

2.3.3 Методика исследования

Для характеристики многолетней изменчивости максимальной толщины льда была использована та же методика, что и для анализа климатических изменений – оценка величины и значимости линейных трендов.

Изменения продолжительности ледостава оценивались как разность средних значений за «стабильный» период и период с климатическими изменениями. В качестве границы этих периодов по результатам анализа изменений климата был принят 1987 год.

Влияние изменений климатических характеристик на зимний сток оценивалось с использованием методов корреляционного и регрессионного анализа. Расчет коэффициентов парной корреляции величин стока и показателей климатических факторов выполнялся как для зимнего, так и для весеннего стока. Величина и интенсивность изменений стока оценивались через величину и значимость линейных трендов.

2.3.4 Результаты

Зимний сток. Из результатов анализа, представленных в таблице 2.6, видно, что с достаточной уверенностью можно говорить о связи зимнего стока с рассматриваемыми климатическими характеристиками лишь в случае бассейна р. Ема. Для рек Сухона и Юг полученные коэффициенты корреляции слишком малы и не могут получить конкретной интерпретации. Вероятно, это связано с тем, что малые водосборы более ярко реагируют на климатические изменения, происходящие на их территории. Очевидно, что происходящие изменения пока не оказывают заметного влияния на зимний сток средних, а тем более крупных рек.

Таблица 2.6. Корреляционный анализ влияния климатических факторов на сток рек в зимний и весенний период

Параметр	XI-XII	I-II	III	IV-V	Тренд (м³/10 лет) за 1958-2016 гг.	
					Зимний сток	Весенний сток
р. Ема – с. Новое (179 км²)						
Γ _{prec}	0.40	0.32	0.49	-	+0.10 (+21%)*	-0.20 (-3.5 %)
Γ _{dtmp}	0.37	0.19	0.54	-0.44		
Γ _{swe}	-0.14	-0.27	-0.22	0.42		
р. Сухона – д. Каликино (49200 км²)						
Γ _{prec}	0.19	-0.18	0.06	-	+4.53 (+3%)	-34.2 (-2.9 %)
Γ _{dtmp}	0.33	-0.09	-0.03	-0.08		
Γ _{swe}	-0.03	0.01	-0.06	0.38		
р. Юг – с. Кичменгский городок (8890 км²)						
Γ _{prec}	0.24	-0.02	-0.12	-	+1.45 (+5%)	-1.18 (-0.5 %)
Γ _{dtmp}	0.14	-0.03	-0.18	-0.16		
Γ _{swe}	0.02	0.06	0.10	0.56		

Примечание: римскими цифрами обозначены порядковые номера месяцев года; в скобках указаны величины трендов в процентах от среднего за весь период; r_{prec} , r_{dtmp} , r_{swe} — коэффициенты корреляции стока с количеством жидких осадков, количеством дней с положительной температурой воздуха и запасом воды в снеге соответственно.

Многолетний ход величины зимнего стока на реках Сухона, Юг и Ема подтверждает сделанный вывод. Средние зимние расходы р. Ема с 1988 года имеют тенденцию к увеличению, которая, однако, не имеет статистической значимости из-за большой амплитуды межгодовой изменчивости. Тем не менее, средняя величина зимнего стока за период 1988-2016 гг. в 2 раза больше, чем за период 1958-1987 гг. (0.635 м³/с и 0.301 м³/с соответственно). Можно отметить, что в 2006 году величина зимнего стока достигла своего исторического максимума (2.16 м³/с), почти в 2 раза превысив максимум предшествующего периода (1.12 м³/с).

Что касается зимнего стока рек Сухона и Юг, то его многолетняя изменчивость в целом соответствует циклам водности. Выраженной тенденции, соответствующей климатическим изменениям в бассейне, не наблюдается. Однако для р. Сухона с 1988 года отмечается увеличение повторяемости аномально высокого зимнего стока. В период 1958-1987 гг. средний за зиму расход превысил 200 м³/с 6 раз, а в период 1988-2014 гг. - 11 раз. При этом в 2006, 2008, 2009 и 2012 годах средний за зиму расход воды превысил 300 м³/с, что в предшествующий период наблюдалось с повторяемостью менее, чем 1 раз в 10 лет.

Весенний сток. По результатам анализа весеннего стока (средний расход воды за апрель и май) было выявлено, что на реках Ема и Сухона наблюдается четко выраженная тенденция к уменьшению его величин (табл. 2.6). Зависимости весеннего стока от количества дней с положительной температурой за зимний период имеют отрицательные коэффициенты корреляции. Изменение внутригодового распределения стока, а именно увеличение зимней и уменьшение весенней его составляющей, происходит по следующим причинам. Одной из ведущих, очевидно, является уменьшение максимальных запасов воды в снеге, характерное для бассейна р. Сухоны, о котором говорилось выше. Для бассейна р. Юг, где наблюдается незначительное увеличение запасов воды в снеге, выраженной тенденции к уменьшению весенних расходов нет (хотя нет и тенденции к их увеличению). Одновременно с увеличением зимних осадков происходит увеличение количества дней с оттепелями (количества безморозных дней) в холодный период, что способствует частичному стаиванию снега, пополнению грунтового стока и, соответственно, уменьшению стока весеннего половодья. Эта тенденция наиболее явно выражена на водосборах небольших размеров.

Максимальные уровни весеннего половодья. Значимых трендов изменения максимальных весенних уровней за период нестабильности климата (1988-2017 гг.) на рассмотренных реках не наблюдается. Однако можно выделить некоторые тенденции.

На р. Сухона (г/п Каликино) наблюдается уменьшение максимальных весенних уровней, что соответствует отмеченной выше тенденции к сокращению объема весеннего стока. При этом, в последние годы в этом створе увеличилась амплитуда межгодовой изменчивости и участились случаи превышения уровнем воды отметки 8 м (БС, над «0» графика). В гидростворах р. Юг – Кичменгский городок и р. Сухона – г. Великий Устюг наблюдается противоположная ситуация – максимальные уровни воды весеннего половодья имеют тенденцию к увеличению. Объяснение этому можно найти в том, что максимальные паводковые уровни в этих створах часто бывают обусловлены заторными явлениями.

Таблица 2.8 Изменения средних максимальных уровней воды весеннего половодья за период 1988-2016 гг. по сравнению с периодом 1958-1987 гг.

Гидрологический пост	1958÷1987	1988÷2016	Изменение (1981÷2016 - 1951÷1980)	
			изм. в мм	изм. в %
р. Ема - Новое	255	252	-3	-1
р. Юг - Кичменгский Городок	567	587	20	8
р. Сухона - Каликино	670	622	-48	-3
р. Сухона - Великий Устюг	633	649	16	2

2.3.5 Выводы

1. На реках бассейна Малой Северной Двины, начиная с конца 1980х годов, сокращается период ледостава и уменьшается максимальная за год толщина льда; на р. Сухона даты начала ледостава значительно (в среднем на 14 дней) сдвинулись в сторону более поздних;
2. Происходящие климатические изменения способствуют перераспределению стока внутри года: увеличивается зимний сток и уменьшается весенний, что отчетливо прослеживается на малых реках и менее явно на средних и крупных;
3. В бассейне р. Сухона происходит уменьшение средних весенних расходов, во многом за счет уменьшения запасов воды в снеге;

2.4 Влияние наблюдаемых изменений на образование заторов у г. Великий Устюг

Рассмотрев многолетние изменения климатических и гидрологических характеристик на территории бассейна Малой Северной Двины, мы подошли к главному вопросу – как наблюдаемые изменения могут повлиять на ледовый режим рек.

По результатам многочисленных исследований, о которых речь шла выше, на р. Малая Северная Двина ведущим фактором формирования весенних заторов льда является максимальный уровень воды в начале ледостава. Этот уровень во многом определяется наличием в русле шуги. Интенсивность образования шуги в свою очередь зависит от соотношения между скоростью потока и температурой воздуха в период замерзания. Наиболее благоприятными условиями для процесса шугообразования являются обильные жидкие осадки и снеготаяние в период оттепелей, что приводит к увеличению скорости потока при температуре воды, близкой к 0 °C [8].

Для рассматриваемого региона характерна большая изменчивость температуры воздуха в переходные периоды как следствие его географического положения. Оттепели в осенне-зимний период, и, в особенности, в период замерзания случались и до начала климатических изменений. Однако сейчас, с наблюдаемой устойчивой тенденцией к увеличению количества оттепелей, вероятность замерзания рек с шугоходом и образованием зажоров значительно возрастает. Об этом свидетельствует значительный сдвиг начала ледостава на р. Сухона (в среднем на 14 дней позже). В качестве примера негативных последствий неустойчивого температурного режима в начале зимы можно привести последнее выдающееся наводнение в г. Великий Устюг в 2016 году, когда основным фактором, повлиявшим на формирование затора, стала значительная зашугованность русла, сохранявшаяся до начала марта [16].

Как было отмечено выше, в рассматриваемом регионе наблюдается также уменьшение максимальной толщины льда, уменьшение величины весенних расходов и значительное увеличение количества теплых дней в феврале и марте. Все эти факторы, в общем случае,

способствуют снижению повторяемости крупных заторов льда, поскольку соответствуют ситуации теплого вскрытия рек [42]. Согласно [3], наиболее благоприятным сочетанием условий в период вскрытия для спокойной ледовой обстановки на рассматриваемом участке являются: малая толщина и прочность ледового покрова, затяжной характер весеннего половодья при относительно небольших расходах воды, разновременное прохождение ледохода на р. Сухона и р. Юг. Вследствие наблюдаемых климатических изменений такое сочетание условий становится более вероятным.

Если подойти к вопросу с точки зрения гидравлико-морфометрических характеристик участка, то можно вспомнить, что при небольших половодных расходах и вскрытии Юга раньше или одновременно с Сухоней, голова затора формируется в устье Сухоны, поскольку движение льда останавливается подпором со стороны Юга. Учитывая наблюдаемые тенденции к уменьшению максимальных весенних расходов и смещению дат вскрытия р. Юг к более ранним, можно предположить, что такое развитие событий становится более вероятным. Что касается перекатных участков, которые являются основными очагами затороформирования, то тенденция к более частому замерзанию по «зажорному» типу определенно может повлечь увеличение повторяемости заторов.

Подводя итог, можно сказать, что наблюдаемые изменения факторов формирования заторов имеют разнонаправленное влияние. Поэтому достаточно трудно дать объективную оценку изменений в будущем. Не стоит также забывать о проведении противозаторных мероприятий, включающих строительство противозаторных сооружений, в исследуемом регионе. Однако автор склонен полагать, что вероятность образования новых ледовых заторов в результате текущих и возможных будущих гидроклиматических изменений в бассейне не снижается.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ О ЗАПАСЕ ВОДЫ В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ

3.1 Введение

Для региона, в котором расположен бассейн р. Северная Двина, снег является основным источником питания рек [5]. На долю снегового питания здесь приходится от 50 до 70 % от общего стока [28]. Запас воды, накопленный за зиму в снежном покрове, составляет объем весеннего половодья и во многом обуславливает максимальные половодные расходы, поэтому является одним из основных параметров, используемых в методиках прогнозирования.

Как было показано выше, уменьшение максимальных за зиму запасов воды в снеге, которое наблюдается в бассейнах некоторых рек региона, уже сейчас, при сравнительно невысоком уровне изменений, оказывает заметное влияние на весенний сток. Стоит также отметить, что часть талых вод идет на пополнение грунтовых вод, которыми реки питаются в меженные периоды. Так, особенно малоснежные зимы могут повлечь за собой глубокую летнюю межень, что является неблагоприятным явлением.

Таким образом, величина запаса воды в снеге, накопленная к концу зимнего периода, является весьма важной характеристикой. В условиях потепления климата необходим мониторинг состояния снежного покрова.

В настоящее время, основной источник информации о запасе воды в снеге – маршрутные снегомерные съемки, выполняемые на станциях гидрометеорологической сети. Однако этих данных не всегда бывает достаточно для исследований, так как они имеют точечный характер, причем пункты наблюдений распределены по территории страны крайне неравномерно. В качестве дополнительного источника информации могут быть использованы данные глобальных архивов (баз данных) по запасу воды в снежном покрове, поскольку они имеют ряд преимуществ, восполняющих недостатки данных наземных наблюдений. Среди этих преимуществ, прежде всего, стоит назвать глобальность (данные доступны для всей территории Российской Федерации и сопредельных территорий), регулярность и возможность выбора данных различной периодичности, отсутствие пропущенных значений и т.п.

Первая глобальная база данных, содержащая информацию о запасе воды в снежном покрове, появилась в 2005 году. В настоящее время в открытом доступе находится уже 6 баз данных, причем многие из них – в различных модификациях. Однако качество предоставляемой глобальными архивами информации до сих пор находится под сомнением. Факт того, что значения запаса воды в снеге, полученные с помощью микроволнового радиозондирования Земли из космоса, как правило, сильно занижены, общеизвестен.

Неизвестна, однако, величина этого занижения для различных регионов. Что касается данных другого генезиса (ассимиляция спутниковых и наземных данных, моделирование и др.), то они являются в некоторой мере «темной лошадкой».

Так, в условиях дефицита информации, полученной посредством наземных наблюдений, может возникнуть необходимость прибегать к другим источникам. Проблема выбора базы данных, которая содержит наиболее точную (с точки зрения соответствия фактическому запасу воды в снеге) информацию, становится достаточно острой и требует решения. Цель данного исследования – выполнить комплексную оценку точности и взаимосравнение всех доступных в настоящий момент глобальных баз данных по запасу воды в снежном покрове для бассейна р. Северная Двина. В задачи исследования входит:

1. Разработка методики оценки точности предоставляемой информации на основе сравнения с данными наземных наблюдений на метеостанциях;
2. Разработка методики сравнения данных, предоставляемых глобальными базами, с учетом их различного генезиса и несовпадения периодов наблюдений;
3. Оценка точности и взаимосравнение данных, предоставляемых глобальными архивами, в соответствии с разработанной методикой;
4. Подведение итогов и формирование выводов.

Сравнение данных различного генезиса позволит определить тот способ получения информации о запасе воды в снежном покрове, которые дает наиболее качественные результаты. Такие оценки очень важны, поскольку непрямые методы определения различных природных характеристик в настоящее время активно развиваются, а к выбору наиболее эффективных и перспективных путей развития необходимо подходить обоснованно. Тем не менее, одновременная комплексная оценка точности всех существующих глобальных баз данных по запасу воды в снежном покрове до настоящего момента не была осуществлена как в России, так и за рубежом.

3.2 Исходные данные

3.2.1 Глобальные базы данных о запасе воды в снежном покрове

В поле рассмотрения вошли шесть баз данных, содержащих информацию о запасе воды в снеге. Основным критерием выбора стал свободный доступ к данным (были рассмотрены все базы данных, на сегодняшний момент находящиеся в открытом доступе). В таблице 4.1 представлены их основные характеристики. Общей характеристикой является минимальное покрытие размером с Северное полушарие, что дает возможность получить информацию для любого региона Российской Федерации, а также сопредельных территорий. Все

рассмотренные базы данных можно скачать на сайте Национального центра данных по снегу и льду США (www.nsidc.org).

Таблица 3.1 Архивы данных о запасе воды в снежном покрове, используемые в исследовании

Название базы данных	Разрешение		Период наблюдений	Формат данных
	временное	пространственное		
Global Monthly EASE-Grid Snow Water Equivalent Climatology, Version 1	Месяц	25 км x 25 км	1978 – 2007 гг.	Binary
AMSR-E/Aqua L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids, Version 2	Сутки 5 дней Месяц	25 км x 25 км	2002 – 2011 гг.	HDF
AMSR-E/AMSR2 Unified L3 Global 25 km EASE-Grid Snow Water Equivalent, Version 1	Сутки 5 дней	25 км x 25 км	2012 г. – по наст. время	HDF-EOS
ESA GlobSnow Snow Water Equivalent (SWE), Version 2	Сутки	25 км x 25 км	1979 г. – по наст. время	HDF
	Неделя			NetCDF
Global EASE-Grid 8-day Blended SSM/I and MODIS Snow Cover, Version 1	8 дней	25 км x 25 км	2000 – 2008 гг.	HDF
Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data, Version 1	Месяц	24 км x 24 км	1998 – 2018 гг.	ASCII GeoTIFF

Из шести рассмотренных баз данных многие имеют по несколько модификаций: три представлены в различном временном разрешении (суточное, 5-ти дневное/недельное и месячное), и одна, помимо среднемесячных, содержит максимальные за месяц значения запаса воды в снеге. При таком обилии информации необходимо иметь в виду трудоёмкость ее обработки и осуществления расчетов (базы данных имеют разные форматы данных, периоды наблюдений, пространственное и временное разрешение – см. табл. 3.1). Это привело к решению ограничиться анализом только среднемесячных величин запаса воды в снеге.

Ниже приведено краткое описание используемых в исследовании архивов.

Глобальная климатическая база данных месячных значений запаса воды в снеге Global Monthly EASE-Grid Snow Water Equivalent Climatology (далее – **SWEC**) является «родоначальником» подобных источников информации. Первый релиз датируется 1 мая 2005

г. Она содержит среднемесячные значения запаса воды в снежном покрове. Данные представлены в 25-километровых равновеликих масштабируемых ячейках сетки земной поверхности Equal-Area Scalable Earth Grids (EASE-Grids) для Северного и Южного полушарий. Расчет запаса воды в снеге основан на спутниковых данных о радиояркостной температуре, фиксируемой сканирующим многоканальным микроволновым радиометром Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) с использованием специального сенсора Special Sensor Microwave/Imagers (SSM/I) для получения изображений в микроволновом диапазоне. Детальное описание алгоритма и уравнений представлено в работах [37, 38].

Вторая база данных - AMSR-E/Aqua Monthly L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids (далее – **AMSR-E**) является в своем роде продолжением и правопреемником архива **SWEC**. Среднемесячные значения запаса воды в снеге доступны в том же пространственном и временном разрешении и в той же проекции (EASE-Grids). Исходные данные получены с помощью усовершенствованного пассивного микроволнового радиометра Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR), запущенного на спутнике Aqua в мае 2002 г. Основой алгоритма определения запаса воды в снеге является двухчастотная модель, основанная на его восстановлении по данным о радиояркостной температуре (та же, что использовалась для создания данных **SWEC**). В исходную модель были внесены модификации с целью усовершенствования метода расчета. Они описаны в работе [40].

Третья база данных, рассмотренная в рамках исследования, – продукт объединения данных усовершенствованных микроволновых сканирующих радиометров AMSR-E/AMSR2 Unified L3 Global 25 km EASE-Grid Snow Water Equivalent (далее – **AMSR-U2**). Этот архив, как видно из названия и характеристик, является логическим продолжением проекта **AMSR-E** (более современный радиометр AMSR2 является улучшенной версией радиометра AMSR-E). Однако предварительный анализ данных **AMSR-U2** выявил, что они демонстрируют практически полное отсутствие снега в исследуемом бассейне (как и для всей Европейской территории России), что, с точки зрения климатических и географических особенностей исследуемого региона, не является возможным. Поэтому данные базы **AMSR-U2** не были использованы в сравнительном анализе. Создателям архива было направлено информационное письмо.

Четвертая база данных, ESA GlobSnow Snow Water Equivalent (далее - **ESA**), была разработана в Европейском космическом агентстве. Этот архив представляет несомненный интерес, поскольку содержит данные иного генезиса, чем в архивы **SWEC** и **AMSR-E**: вычисление запаса воды в снежном покрове основано на ассимиляции данных спутникового микроволнового радиометра с наземными данными метеорологических метеостанций [41]. Большим преимуществом этой базы данных является то, что она содержит информацию за

достаточно длительный период (с 1979 г.) и продолжает регулярно пополняться. Данные предоставляются в различном временном разрешении (сутки/неделя/месяц) в ячейках регулярной сетки EASE-Grids.

Пятый архив – Global EASE-Grid 8-day Blended SSM/I and MODIS Snow Cover (далее – **Blended**). Он содержит данные о запасе воды в снеге за период с 2000 по 2008 г. с восьмидневным временным разрешением. Пространственное разрешение – сетка EASE-Grids с ячейками 25×25 км (то же, что и у всех вышеперечисленных архивов). Расчет запаса воды в снеге осуществляется на основе информации SSM/I по алгоритмам, близким к алгоритмам создания данных **SWEC** и **AMSR-E**, для территории, покрытой снежным покровом (согласно микроволновым данным по заснеженности MODIS/Terra Snow Cover data). В рамках исследования оригинальные данные в восьмидневном временном масштабе осреднялись до месячных значений.

Шестая база данных – Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data (далее – **CMC**). Она была разработана в Метеорологическом центре Канады. Среднемесячный запас воды в снеге в ячейках сетки разрешением 24×24 км рассчитывается на основе данных о высоте снежного покрова, полученных по результатам наземных наблюдений (данные ВМО) путем моделирования с помощью специально разработанной модели аккумуляции и таяния снежного покрова. Архив **CMC** содержит данные за период с 1998 по 2018 гг. и продолжает регулярно пополняться. Как указано авторами архива в описании [35], данные не являются однородными, так как создаются на основе оперативной информации, часто подверженной различным изменениям.

Завершить описание глобальных данных можно обобщением: **SWEC**, **AMSR-E**, **AMSR-U2** и **Blended** – данные дистанционного зондирования; **ESA** и **CMC** – данные ассимиляции и моделирования на основе наземных наблюдений. Три из шести рассмотренных архивов (**ESA**, **CMC** и **AMSR-U2**) – актуальные данные, периодически пополняющиеся новой информацией.

Как видно из описания, архивы данных содержат информацию за различные промежутки времени. Период совместных наблюдений составил всего шесть лет (с 2002 по 2007 гг.), т.е. пять полноценных зимних периодов. Первый этап анализа проводился на этом общем для всех баз временном отрезке. Однако на последующем этапе наиболее достоверные данные по итогам сравнения за период 2002-2007 гг. отдельно были сопоставлены с данными наземных наблюдений за весь доступный период, о чем более подробно пойдет речь ниже.

На рисунке 3.1 в качестве примера представлено пространственное распределение запасов воды в снеге на Европейской территории России по каждой из вышеописанных баз.

Представленная визуализация достаточно наглядно демонстрирует особенности анализируемых данных.

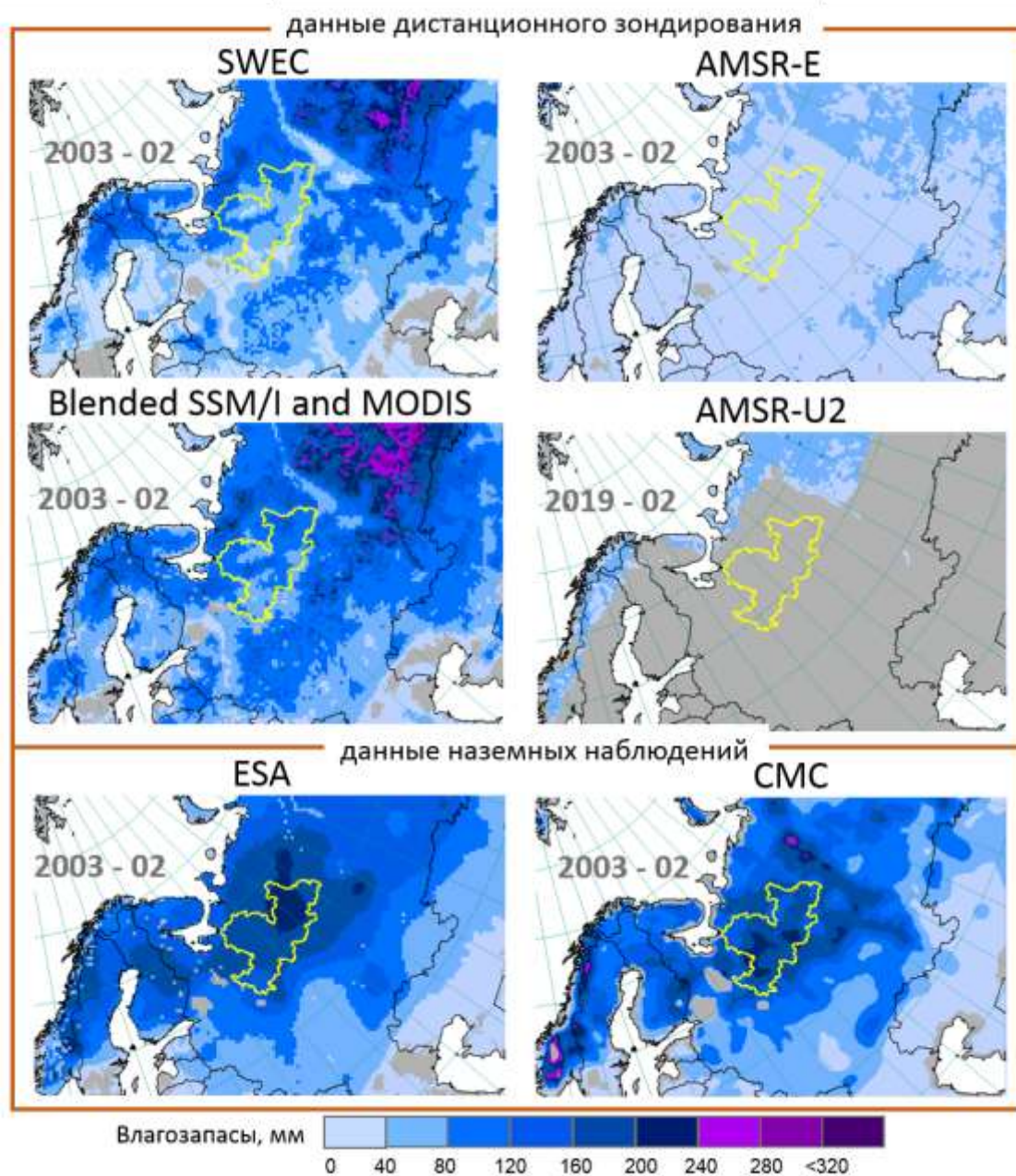


Рисунок 3.1 Пространственное распределение месячных значений влагозапасов в снежном покрове по данным шести глобальных архивов за февраль 2003 г./февраль 2019 г. (бассейн Северной Двины выделен желтой линией)

3.2.2 Данные наземных наблюдений

В качестве эталона для оценки точности данных о запасе воды в снеге, предоставляемых глобальными архивами, использовались данные маршрутных снегомерных съемок. Последние находятся в открытом доступе на сайте ВНИИГМИ-МЦД [11]. Были использованы данные семи метеостанций, расположенных в бассейне р. Северная Двина (см. рис. 3.2):

- Сура (22676);
- Шенкурск (22768);
- Котлас (22887);
- Великий Устюг (22981);
- Тотьма (27051);
- Никольск (27066);
- Опарино (27083).

Так как по регламенту маршрутные снегомерные съемки осуществляются через каждые 10 дней в течение холодного периода и каждые пять дней в период интенсивного снеготаяния, то декадные и пентадные значения запаса воды в снежном покрове были использованы для расчёта средних месячных значений.

3.3 Методы и средства

3.3.1 Первичная обработка информации

Для анализа и обработки информации о запасе воды в снежном покрове из вышеперечисленных архивов данных было использовано программное обеспечение, разработанное М.В. Георгиевским. Оно представляет набор программ-утилит на языке C++, позволяющих осуществлять: анализ качества исходной информации; расчет осреднённых по площади значений запаса воды в снеге в зависимости от заданного временного периода или сезона различной периодичности; расчет максимальных значений запаса воды в снеге перед началом снеготаяния; конвертацию исходных и рассчитанных данных в различные форматы (текстовые, бинарные, растровые, HDF и т.п.), а также в различные проекции земной поверхности. Основным преимуществом разработанного программного комплекса является возможность визуализации данных в геоинформационной системе ArcGIS.

3.3.2 Методика оценки точности и взаимосравнения данных

Для осуществления цели исследования была разработана методика, позволяющая выявить данные, которые в наибольшей степени соответствуют наземным наблюдениям.

В основе методики лежат параметры⁵, вычисляемые для каждой базы данных относительно принятого эталона (данных наземных наблюдений) и позволяющие оценить достоверность информации в них:

⁵ Поскольку короткий ряд совместных наблюдений не позволяет получить информативные статистические характеристики, изначально предполагавшийся набор параметров был сокращен до двух.

1. Величина средней ошибки (в процентах) – разность средних за период величин запаса воды в снеге;
2. Отношение значений линейных трендов изменений запаса воды в снеге за период совместных наблюдений.

Эти параметры вычислялись для:

- периода накопления снежного покрова (ноябрь-январь);
- периода деградации снежного покрова (февраль-апрель);
- максимального годового запаса воды в снеге (по среднемесячным значениям).

Для взаимосравнения баз данных с точки зрения достоверности предоставляемой информации каждой из них был присвоен ранг от 1 до 5 (от лучшего к худшему) по каждому параметру. Итоговый набор полученных рангов характеризует качество информации в каждой конкретной базе данных относительно остальных.

Как было сказано выше, сравнение осуществлялось в рамках периода совместных наблюдений (с 2002 по 2007 г. – 5 зимних периодов). Несмотря на ограниченные возможности для статистически обоснованного анализа из-за короткого ряда совместных наблюдений, используемая схема оценки позволяет получить достаточно конкретные и информативные результаты (как будет показано ниже).

Вторым этапом анализа стало сравнение хронологических графиков максимальных за зимний период среднемесячных запасов воды в снеге по данным архивов и по данным снегомерных съемок за весь период совместных наблюдений. На этом этапе использовались данные только тех архивов, которые содержат ряд наблюдений продолжительностью от 20 лет. Сравнение выполнялось посредством корреляционного анализа, а также вычисления разности средних за период величин (средней ошибки).

Анализ данных глобальных архивов осуществлялся на трех масштабах пространственного осреднения исходной информации:

- для одной ячейки (625 км²);
- для бассейна р. Малая Северная Двина (86000 км²);
- для всего бассейна р. Северная Двина (357000 км²).

Такой подход дает возможность выявить, как изменяется соответствие между данными глобальных архивов наземным наблюдениям с увеличением площади исследуемой территории. Это позволит дать ориентировочные рекомендации относительно использования глобальных баз данных для бассейнов различных размеров. Для бассейна р. Малая Северная Двина использовались данные 4-х метеостанций (27066, 27083, 27051, 22981), для всего бассейна р. Северная Двина – 7-ми метеостанций (22676, 22768, 22887 в дополнение к

вышеперечисленным), для одной ячейки – данные по метеостанции Никольск (27066), которая расположена на территории, покрываемой этой ячейкой (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 Бассейн реки Северная Двина с метеорологическими станциями, данные которых использовались в исследовании, включая метеостанцию г. Никольск (выделена розовым кругом).

Дополнительно был выполнен корреляционный анализ связи многолетних колебаний максимальных сезонных влагозапасов в снежном покрове с изменениями климата, прежде всего, с температурой воздуха в течение зимы.

3.4 Результаты

Как уже было сказано выше, в ходе анализа выяснилось, что значения запаса воды в снеге по данным **AMSR-U2** близки к нулевым значениям (по состоянию на октябрь 2019 года). Это, вероятно, является результатом системной ошибки в алгоритмах обработки исходной информации. По этой причине база данных была исключена из дальнейших исследований, а

анализ точности и взаимосравнения осуществлялся для оставшихся пяти архивов (**SWEC**, **AMSR-E2**, **ESA**, **Blended** и **CMC**).

В на рисунке 3.3 и в таблице 3.2 представлены результаты оценки соответствия предоставляемых глобальными архивами данных наземным наблюдениям за период 2002-2007 гг. (период совместных наблюдений). Как говорилось выше, результаты получены отдельно для трех территориальных единиц: одной ячейки, где расположена метеорологическая станция г. Никольск (625 км²), бассейна р. Малая Северная Двина (86 тыс. км²) и всего бассейна р. Северная Двина (357 тыс. км²). В таблице 4.2 представлены также результаты ранжирования баз данных (1-й ранг – предоставляемые данные в наибольшей степени среди рассмотренных источников соответствуют данным наземных наблюдений).

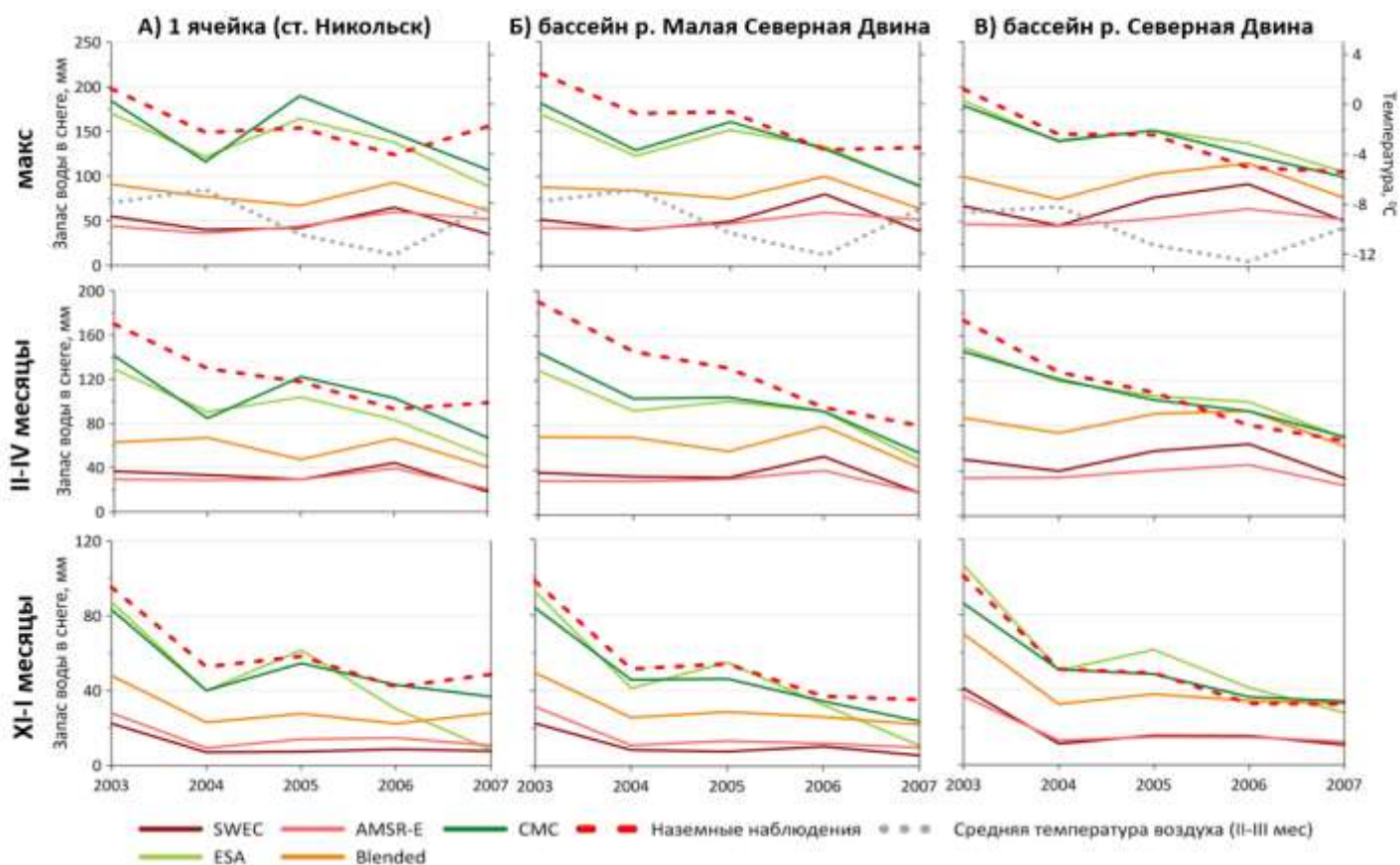


Рисунок 3.3 Хронологические графики средних величин запаса воды в снеге за пять зимних периодов (с 2002-03 до 2006-07) по данным глобальных архивов и наземных наблюдений (XI-I месяцы – период накопления снежного покрова, II-IV месяцы – период абляции снежного покрова, макс – максимальный запас воды в снеге перед началом таяния

Таблица 3.2 Ранжирование баз данных по рассчитанным значениям параметров за общий период наблюдений (2002-2007 гг.)

Территория	База данных	ноябрь-январь		февраль-апрель		максимальные годовые		Итоговый ранг
		Δ , %	K_t , б/р	Δ , %	K_t , б/р	Δ , %	K_t , б/р	
Никольск (1 ячейка) 625 км ²	CMC	14 (1)	0,87 (1)	15 (1)	0,73 (2)	5 (1)	1,13 (1)	1
	ESA	24 (2)	1,61 (2)	25 (2)	0,92 (1)	13 (2)	1,36 (2)	2
	Blended	49 (3)	0,39 (2)	53 (3)	0,26 (3)	50 (3)	0,40 (3)	3
	SWEC	83 (5)	0,27 (5)	73 (4)	0,14 (4)	69,7 (4)	0,14 (4)	4
	AMSR-E	75 (4)	0,28 (4)	76 (5)	0,04 (5)	69,8 (5)	-0,37 (5)	5
Малая Северная Двина 86000 км ²	CMC	15 (1)	0,94 (1)	22 (1)	0,70 (1)	16 (1)	0,89 (1)	1
	ESA	16 (2)	1,23 (2)	28 (2)	0,60 (2)	19 (2)	0,74 (2)	2
	Blended	45 (3)	0,39 (3)	50 (3)	0,16 (3)	50 (3)	0,16 (3)	3
	SWEC	80 (5)	0,23 (5)	72 (4)	0,06 (4)	68 (4)	-0,07 (4)	4
	AMSR-E	73 (4)	0,30 (4)	76 (5)	0,04 (5)	70 (5)	-0,18 (5)	5
Северная Двина 357000 км ²	CMC	4 (1)	0,77 (2)	4 (2)	0,690 (1)	2 (2)	0,79 (1)	1
	ESA	-8 (2)	1,07 (1)	2 (1)	0,688 (2)	1 (1)	0,72 (2)	1
	Blended	23 (3)	0,47 (3)	27 (3)	0,12 (3)	34 (3)	0,03 (3)	3
	SWEC	64 (4)	0,36 (4)	56 (4)	0,03 (4)	53 (4)	-0,06 (4)	4
	AMSR-E	66 (5)	0,30 (5)	68 (5)	0,01 (5)	63 (5)	-0,13 (5)	5

Примечание: Δ – занижение средней величины влагозапасов в снеге относительно наземных наблюдений, %; K_t – отношение значений линейных трендов изменений запаса воды в снежном покрове за рассматриваемый период по данным архива и по данным наземных наблюдений (в случае $K_t = 1$ тренды полностью совпадают, в случае $K_t < 0$ тренды противоположны); в скобках указаны ранги по конкретному параметру.

Обобщая результаты, представленные в таблице 3.2, выделим две базы данных, содержащие наиболее достоверные данные: **ESA** и **CMC**. Количественную оценку максимальных запасов воды в снеге, предоставленную этими архивами, можно считать достоверной: за рассматриваемый период средняя величина в большинстве случаев не отклоняется от среднего по наземным наблюдениям более чем на 15 %, а для всего бассейна р. Северная Двина величина отклонения составляет всего лишь около 2-4% (см. табл. 3.2). Отклонение в подавляющем большинстве случаев – в сторону занижения наблюдаемых значений. База данных **CMC** содержит информацию, в наибольшей степени (из рассмотренных пяти архивов) соответствующую данным наземных наблюдений. Причем это справедливо как для различных периодов существования снежного покрова, так и для территорий разного пространственного масштаба. Значения запаса воды в снеге **ESA** также весьма близки к таковым по данным наземных наблюдений. При этом степень соответствия выше в январе-марте, то есть в те месяцы, когда величина запаса воды в снеге достигает максимальных за год значений. В начальный период снегонакопления (ноябрь и декабрь) данные **ESA** несколько хуже соответствуют данным снегосъемок (см. табл. 3.2).

Средние значения запаса воды в снеге по данным **SWEC** и **AMSR-E** занижены на 50-80% по отношению к данным наземных наблюдений, по данным **Blended** – более чем на 25% (см. табл. 3.2). Кроме того, линейный тренд изменений максимальных запасов воды в снеге за период 2002-2007 гг. по данным **SWEC** и **AMSR-E** отражен неверно (наблюдается тенденция к увеличению максимальных снегозапасов, тогда как, по данным наземных наблюдений, они уменьшаются). При этом с увеличением рассматриваемой площади степень соответствия данных **SWEC**, **AMSR-E** и **Blended** результатам снегомерных съемок изменяется незначительно.

Разносторонний анализ данных глобальных архивов (для разных периодов холодного сезона и для территорий различного размера) позволил не только оценить достоверность предоставляемой информации, но и выявить отдельные слабые стороны. Так, интересно отметить, что в одних архивах качество данных лучше для периода накопления снежного покрова (**AMSR-E2** и **Blended**), а в других – для периода максимальных снегозапасов (**SWEC**, **ESA** и **CMC**) (см. табл. 3.2). С увеличением рассматриваемой площади степень соответствия между архивными данными и данными наземных наблюдений, в целом, увеличивается, но увеличивается незначительно. Это говорит о том, что данные глобальных архивов представляют собой приближенную оценку пространственно осредненной величины запаса воды в снеге, однако расхождения с наземными наблюдениями, возникающие в результате осреднения, играют далеко не ведущую роль. Тем не менее, сфера применения данных глобальных сеточных архивов о запасе воды в снежном покрове имеет ограничения по масштабу рассматриваемой территории – оптимально использовать эти данные для бассейнов крупных рек.

Подводя итог, можно сделать вывод, что данные спутникового дистанционного зондирования (**SWEC** и **AMSR-E**) явно проигрывают в качестве данным, алгоритмы создания которых основаны на использовании наземных наблюдений (**ESA** и **CMC**).

Следующим этапом комплексной оценки точности был анализ соответствия данных глобальных архивов данным наземных наблюдений по многолетним рядам большой продолжительности. В анализе участвовали архивы, содержащие наиболее продолжительные ряды: **ESA** (1979-2016 гг. - 36 зимних периодов), **CMC** (1998-2017 гг. 18 зимних периодов) и **SWEC** (1978-2007 гг. – 28 зимних периодов). Полученные результаты представлены в таблице 3.3 и на рисунке 3.4.

Таблица 3.3. Рассчитанные значения параметров, характеризующие данные трех архивов за периоды совместных наблюдений.

База	Период, гг.	Параметр	Малая Северная Двина 86 тыс. км ²	Северная Двина 357 тыс. км ²
CMC	1998-2017	r_{swe}	0,55	0,73
		Δ , %	15	-2
		r_{tmp}	-0,36	-0,31
ESA	1979-2016	r_{swe}	0,51	0,72
		Δ , %	28	5
		r_{tmp}	-0,43	-0,40
SWEC	1978-2007	r_{swe}	-0,28	-0,20
		Δ , %	59	43
		r_{tmp}	-0,75	-0,76

Примечание: r_{swe} – коэффициент корреляции с данными наземных наблюдений; Δ – занижение средней за период величины максимальных снегозапасов относительно наземных наблюдений, %; r_{tmp} – коэффициент корреляции с температурой воздуха, осредненной для каждого года за I-IV месяцы⁶.

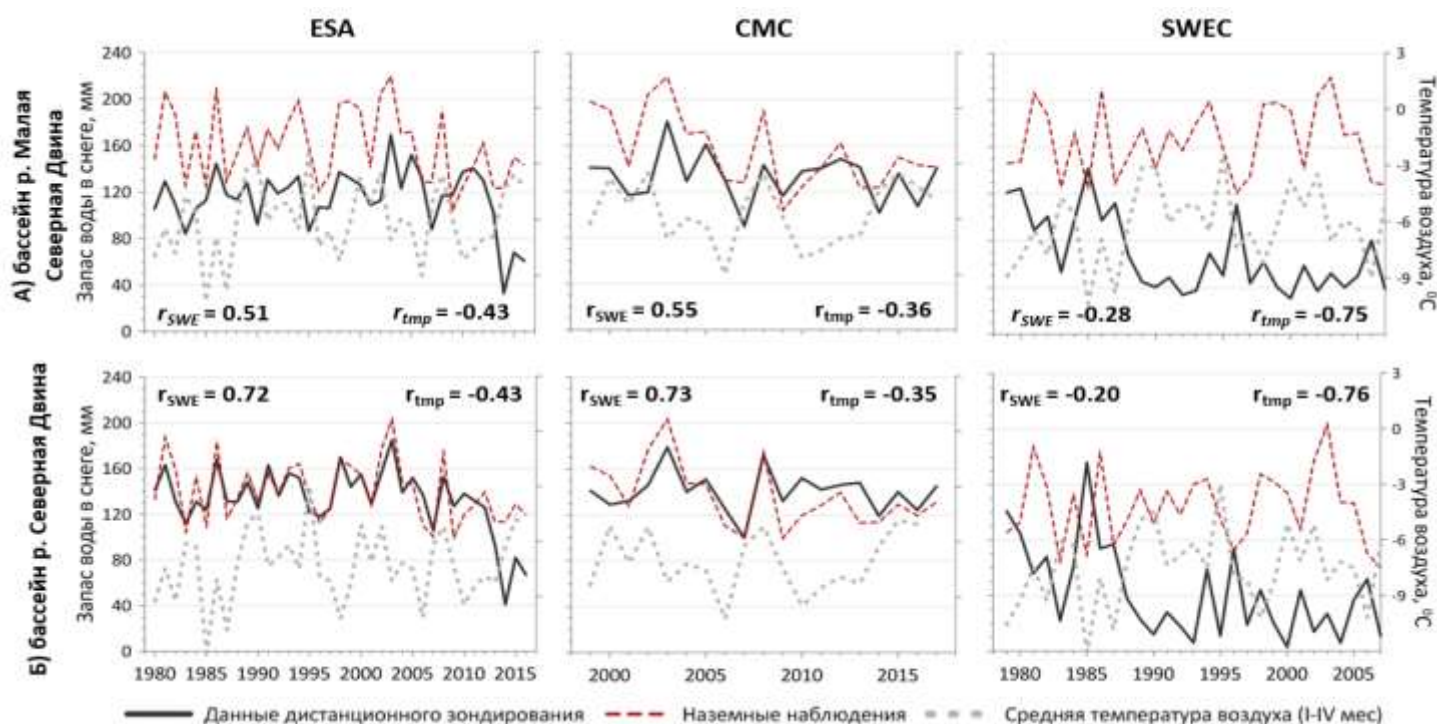


Рисунок 3.4 Совмещенные графики величин максимальных запасов воды в снеге (по архивам ESA, CMC, SWEC и данным наземных наблюдений) и температуры воздуха, осредненной для каждого года за I-IV месяцы (r_{swe} – коэффициент корреляции между наземными и архивными запасами воды в снеге, r_{tmp} – между архивными запасами воды в снеге и приземной температурой воздуха).

⁶ Были использованы данные климатического сеточного архива Climate Research Unit TS v. 4.02 [39].

Были рассчитаны коэффициенты корреляции многолетнего хода максимальных запасов воды в снеге по данным глобальных архивов и наземных наблюдений за указанные периоды для каждой из трех баз данных. Эти коэффициенты составили: 0.51 (**ESA**) и 0.55 (**СМС**) для бассейна р. Малая Северная Двина, 0.72 (**ESA**) и 0.73 (**СМС**) для всего бассейна Северной Двины. Для значений **СМС** характерно занижение в многоснежные периоды и завышение в малоснежные (см. рис. 3.4). Данные **ESA** более однородны, однако для бассейна Малой Северной Двины занижение значений присутствует в большей степени, чем для всего бассейна Северной Двины. Что касается многолетних трендов, то данные обоих архивов отражают их с большой долей достоверности, однако, в этом отношении **ESA** имеет преимущество.

Таким образом, можно говорить о том, что данные **ESA** и **СМС** имеют потенциал в качестве источника информации о запасе воды в снежном покрове, по крайней мере, для бассейнов, расположенных на севере Европейской территории России. Они могут быть весьма полезны для малоизученных бассейнов, в районах с отсутствием данных наземных наблюдений. С точки зрения анализа многолетних изменений влагозапасов в снеге и их взаимосвязи с изменениями климата и водного режима рек, наиболее перспективной является база **ESA**, поскольку она включает в себя данные с 1979 г. Однако стоит иметь в виду, что данные архивов **ESA** и **СМС** все же занижают реальный запас воды в снеге на величину до 15%, поэтому для решения задач, требующих большой точности, необходимо усовершенствование расчетных алгоритмов или введение поправочных коэффициентов.

В дополнение к основному анализу была рассмотрена связь изменений влагозапасов с колебаниями температуры воздуха за зимне-весенний период (I-IV месяцы). Была выявлена интересная закономерность (см. рис. 3.3 и 3.4). Оказалось, что приземная температура воздуха вносит значительную долю систематической ошибки в данные, получаемые посредством микроволнового радиозондирования. Такой вывод можно сделать, обратив внимание на хронологические графики величин запасов воды в снеге по данным архивов **SWEC**, **AMSR-E2** и **Blended**, совмещенные с графиками средней температуры воздуха (см. рис. 3.3), на которых явно прослеживается наличие обратной зависимости. Для подтверждения отмеченной закономерности были рассчитаны коэффициенты корреляции максимальных влагозапасов с зимне-весенней температурой воздуха (I-IV месяцы) для трех баз данных, имеющих наибольшие ряды наблюдений: **SWEC**, **ESA** и **СМС** (см. табл. 3.3. и рис. 3.4). В результате было установлено, что данные **ESA** и **СМС** не имеют четко выраженной зависимости от температуры воздуха, в то время как данные **SWEC** зависят от нее значительно (коэффициент корреляции -0.75). При этом анализ данных наземных наблюдений показал, что

обратная связь между максимальными запасами воды в снеге и зимне-весенней температурой воздуха отсутствует (коэффициент корреляции: 0.15). По всей видимости, объяснение этого феномена можно найти в самом методе получения исходных данных для расчета запаса воды в снежном покрове. Дело в том, что для создания данных **SWEC**, **AMSR-E2** и **Blended** используются значения радиояркостной температуры земной поверхности, полученные с помощью микроволнового зондирования Земли со спутника. Одним из основных недостатков этого метода является то, что при большой степени насыщения снега водой, которая характерна в периоды снеготаяния или оттепелей, происходит увеличение внутреннего поглощения и резко изменяются характеристики микроволнового излучения снежного покрова [34]. Это приводит к тому, что значения радиояркостной температуры показывают очень низкие значения запаса воды в снеге или даже его полное отсутствие. Таким образом, температура воздуха является основным фактором, обуславливающим неудовлетворительное качество данных о запасе воды в снежном покрове, полученных методом микроволнового дистанционного зондирования.

3.5 Выводы

Обобщая полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- в настоящий момент база данных **AMSR-U2** содержит некорректную информацию о запасе воды в снеге для высоких широт Европейской территории России;
- независимо от размеров рассматриваемой территории, наиболее приближенными к наземным наблюдениям являются данные архивов **CMC** и **ESA**, наименее – данные архивов **AMSR-E** и **SWEC**;
- данные о запасе воды в снеге архивов **SWEC**, **AMSR_E** и **Blended** имеют серьезные отклонения от данных наземных наблюдений (величина занижения в большинстве случаев превышает 60% для **SWEC** и **AMSR_E** и 30% для **Blended**), а также неправильно или с серьезными искажениями отражают основные тенденции, зачастую с полным визуальным отсутствием какой-либо корреляции с наземными данными; на сегодняшний день, эти архивы не могут служить надежным источником информации;
- данные архивов **ESA** и **CMC** отклоняются от наземных наблюдений по величине не более чем на 20%, поэтому имеют хорошие перспективы для использования в научных и прикладных исследованиях крупных речных бассейнов;
- значения запаса воды в снеге, полученные по результатам микроволнового зондирования Земли со спутника, зависят от приземной температуры воздуха, что является причиной значительной систематической ошибки, обуславливающей низкое качество данных глобальных архивов **SWEC**, **AMSR_E** и **Blended**.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были решены все поставленные задачи:

- по данным различных источников были исследованы изменения климата в бассейне р. Северная Двина в осенне-зимний период, а также их влияние на водный и ледовый режимы рек и, в частности, на образование заторов льда;
- была количественно оценена величина и интенсивность климатических изменений, наблюдающихся в бассейне р. Малая Северная Двина в осенне-зимний период;
- было выявлено и количественно оценено влияние этих изменений на зимний и весенний сток рек;
- были сделаны обоснованные выводы о влиянии этих изменений на механизм образования заторов на затороопасном участке в узле рек Сухона – Юг – Малая Северная Двина.

Были получены следующие выводы:

1. По данным многочисленных исследований, в бассейне р. Северная Двина в течение последних 40-50 лет наблюдаются значимые тенденции в изменении температурно-влажностного режима в осенне-зимние месяцы, что значительно сказывается на ледовом режиме рек; оценки влияния этих тенденций на водный режим рек неоднозначны.
2. В бассейне р. Малая Северная Двина наблюдаются аналогичные изменения: увеличение количества теплых дней в течение зимнего периода (с ноября по март), которое влечет за собой уменьшение максимальных за зимний период запасов воды в снеге, сокращение продолжительности залегания снега, а также сокращение периода ледостава и уменьшение максимальной толщины ледяного покрова.
3. Среди указанных изменений наибольшее значение для водного режима рек имеет уменьшение максимального запаса воды в снеге – оно приводит к уменьшению объема весеннего стока; наблюдается перераспределение стока внутри года – увеличение зимнего стока за счет уменьшения весеннего, однако для средних и крупных рек его величина незначительна.
4. Сокращение периода ледостава происходит преимущественно за счет смещения сроков замерзания к более поздним; при этом увеличивается продолжительность периода замерзания, что становится основной причиной более частого замерзания рек по «зажорному» типу.
5. Последнее, в сочетании с уменьшением максимальной толщины льда и весенних расходов воды, приводит к тому, что ведущим фактором в механизме образования заторов становится зашугованность русла; поэтому на участках рек с интенсивным зажорообразованием (к числу которых относится участок у г. Великий Устюг), повторяемость заторов может увеличиться.

Дополнительно была рассмотрена возможность использования альтернативных источников информации о запасе воды в снежном покрове (глобальных баз данных различного генезиса) для подобных исследований в случае дефицита данных наземных наблюдений на метеостанциях. В результате анализа данных глобальных сеточных архивов на предмет соответствия данным маршрутных снегомерных съемок были получены следующие выводы:

- данные глобальных архивов SWEC, AMSR-E и Blended практически не соответствуют данным наземных наблюдений; использование их в научных и прикладных целях не представляется рациональным;
- данные глобальных архивов ESA и СМС в высокой степени соответствуют данным наземных наблюдений; рекомендуется использование их для бассейнов крупных рек с учетом занижения значений на величину от 2 до 15 %;
- значения запаса воды в снеге, полученные с помощью микроволнового дистанционного зондирования, содержат систематическую ошибку, связанную с особенностями метода получения исходной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонова С.А., Фролова Н.Л. Особенности ледового режима рек бассейна Северной Двины // Водные ресурсы, 2006. 33, №6. С. 1-9.
2. Агафонова С.А., Фролова Н.Л. Влияние ледового режима рек севера Европейской территории России на гидроэкологическую безопасность в условиях изменения климата // Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2009. №4. С. 55-61.
3. Агафонова С.А., Василенко А.Н., Фролова Н.Л. Факторы образования ледовых заторов на реках бассейна Северной Двины в современных условиях // Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2016. №2. С. 82-90.
4. Агафонова С.А., Фролова Н.Л., Василенко А.Н., Широкова В.А. Ледовый режим и опасные гидрологические явления на реках Арктической зоны Европейской территории России // Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2016. №6. С. 41-49.
5. Алюшинская Н.М., Анискина Н.А., Ивашинова Л.Д. Весенний сток рек бассейна Северной Двины и его прогнозы. // Труды ГГИ. Л.: 1962. № 97. С. 1-137.
6. Бузин В.А. Факторы образования и прогноз заторов льда на реках Европейской территории России // Метеорология и гидрология, 2010. №4. С. 63-74.
7. Бузин В.А., Горошкова Н.И., Стриженко А.В., Палкина Д.А. Зависимости для прогнозов максимальных заторных уровней воды Сухоны, Юга и Малой Северной Двины и влияние на них климатических и антропогенных факторов // Ученые записки РГГМУ. Гидрология, № 36. С. 12-21.
8. Бузин В.А. Зажоры и заторы льда на реках России. СПб., 2015, 240 с.
9. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. «Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России» [Электронный ресурс]. <http://meteo.ru/data/156-temperature>
10. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коришунова Н.Н., Швец Н.В. «Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России» [Электронный ресурс]. <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation>
11. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «Описание массива данных “Маршрутные снегомерные съемки”» [Электронный ресурс]. <http://meteo.ru/data/166-snow-surveys>
12. Верещагин И.Ф. Долговременные факторы внутрирегиональной миграции на территории Архангельской области в XX веке // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Гуманитарные и социальные науки, 2015. С. 5-14.

13. *Винокуров И.О., Коротыгина У.Е.* Современные изменения внутригодового распределения стока реки Северная Двина // Молодой ученый. Материалы III Международной научной конференции «Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра». СПб.: Свое издательство, 2017. С. 38-41.
14. *Вуглинский В.С.* Оценка изменений характеристик ледового режима водных объектов для различных регионов страны в современных климатических условиях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Науки о Земле, 2014. № 3. С. 32-45.
15. *Георгиевский В.Ю., Коронкевич Н.И., Алексеевский Н.И.* Водные ресурсы и гидрологический режим рек РФ в условиях изменения климата // Пленарные доклады VII Всероссийского гидрологического съезда, 19-21 ноября 2013 г. СПб: издание Государственного Гидрологического института, 2014. С. 79-102.
16. *Георгиевский М.В., Горошкова Н.И., Полякова В.С., Голованов О.Ф., Георгиевский Д.В., Скрипник Е.Н.* Условия формирования и полевые исследования ледового затора, послужившего причиной наводнения на р. Сухона у г. Великий Устюг весной 2016 г. // ГеоРиск, 2017. №4. С. 26-34.
17. *Георгиевский М.В., Горошкова Н.И., Полякова В.С., Голованов О.Ф., Георгиевский Д.В.* Экстремальное заторное наводнение весной 2016 г. на реке Сухона у г. Великий Устюг (формирование, прогноз, последствия) // Метеорология и гидрология, 2018. № 2. С. 108-114.
18. Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики. Том 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1980.
19. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том 0. Бассейны Белого и Баренцева морей. Выпуск 8. Бассейны рек Северная Двина, Мезень, Печора. Ч.1 – Реки и каналы. 1958-2016 гг. А.: Гидрометеиздат, 1960-2018.
20. *Грищенко И.В., Водовозова Т.Е.* Тенденции в изменении климата и опасных явлений погоды на территории Архангельской области и Ненецкого автономного округа // Экология человека. Окружающая среда, 2011. №6. С. 22-27.
21. *Донченко Р.В.* Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 246 с.
22. *Ильина, Л. Л., Грахов, А. К.* Реки Севера. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 128 с.
23. *Ильков А.В., Белоусов Р.Л.* Системный анализ факторов заторообразования на реках севера Европейской части России // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты, 2015. № 3. С. 64-72.

24. *Малыгин И.В.* Методика прогноза образования ледовых заторов на реках на основе теории распознавания образов // Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2014. №3. С. 43-47.
25. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История. 2010. 162 с.
26. Отчет ФГБУ «ГГИ» «Комплексные исследования русловых процессов и формирования заторов льда в узле слияния Сухона-Юг-Малая-Северная Двина с целью регулирования процессов заторообразования и разработки противопаводковых мероприятий у г. Великий Устюг». СПб.: ФГБУ «ГГИ». 2014. 221 с.
27. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработать геоинформационную систему мониторинга гидрологического режима р. Северная Двина в зимне-весенний период для оценки вероятности возникновения опасных заторных наводнений» СПб.: ФГБУ «ГГИ», 2018. 58 с.
28. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат. 1972.
29. Руководство по гидрологическим прогнозам. Выпуск 3. Прогноз ледовых явлений на реках и водохранилищах. Л.: Гидрометеиздат. 1989.
30. *Терский П.Н., Фролова Н.Л.* Наводнения на реках Европейской территории России (на примере бассейна р. Северная Двина) // Известия РАН. Серия географическая, 2011. № 3. С. 94-104.
31. *Туткова Т.Б.* Изменение климатических условий формирования зимнего стока в бассейне Верхнего Дона по спутниковым и наземным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019. Т. 16. № 1. С. 147-157.
32. *Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Евстигнеев В.М., Ефремова Н.А., Повалишеникова Е.С.* Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории России и его изменение // Водное хозяйство России, 2015. № 4. С. 4-20.
33. *Шепелёв В.В.* О важности учета техногенных факторов в формировании ледовых заторов на северных реках // Наука и техника в Якутии, 2014. № 1. С. 8-11.
34. *Armstrong, R., Brodzik, M.J., Knowles, K., Savoie, M., 2005.* Global Monthly EASE-Grid Snow Water Equivalent Climatology, Version 1. Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.
35. *Brown, R.D., Brasnett, B., 2010.* Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data, Version 1. Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.

36. *Carson R., Beltaos S., Groeneveld J., Healy D., She Y., et al.* Comparative testing of numerical models of river ice jams // Canadian Journal of Civil Engineering, 2011. № 8. P. 669-678.
37. *Chang, A.T.C., Foster, J.L., Dorothy H.K.*, 1987. Nimbus-7 Derived Global Snow Cover Parameters. Annals of Glaciology, 9: 39-44.
38. *Chang A.T.C., Rango A.*, 2000. Algorithm Theoretical Basis Document for the AMSR-E Snow Water Equivalent Algorithm. November 30, 2000. Version 3.1.
39. *Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H.* Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. International Journal of Climatology. 2014, 34: 623-642.
40. *Kelly, R.E.J., Foster, J.L., Dorothy, K.H.*, 2005. The AMSR-E Snow Water Equivalent Product: Algorithm Development and Progress in Product Validation. Poster presented at the Proceedings of the 28th General Assembly of the Union of International Radio Science, New Delhi, India, 23-29 October 2005.
41. *Takala, M., Luojus, K., Pulliainen, J., Derksen, C., Lemmetyinen, J., Kärnä, J., Koskinen, J., Bojkov, B.*, 2011. Estimating Northern Hemisphere Snow Water Equivalent for Climate Research through Assimilation of Space-Borne Radiometer Data and Ground-Based Measurements. Remote Sensing of Environment, 115, 3517-3529.
42. *Turcotte B., Burrell B. C., Beltaos S.*, The impact of climate change on breakup ice jams in Canada: state of knowledge and research approaches // 20th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. 2019.